

地層処分事業における3次元レーザスキャナを用いた坑道壁面の効率的な地質観察に関する研究

| | |
|--------------------|---|
| その他（別言語等） のタイトル | Efficient Shaft and Gallery Wall Mapping using Three-Dimensional Laser Scanning for Geological Disposal Program |
| 著者 | 早野 明 |
| 学位名 | 博士（工学） |
| 学位の種別 | 課程博士 |
| 報告番号 | 甲第402号 |
| 研究科・専攻 | 工学専攻 |
| 学位授与年月日 | 2017-09-25 |
| URL | http://hdl.handle.net/10258/00009623 |

博士学位論文

地層処分事業における 3 次元レーザスキャナを用いた
坑道壁面の効率的な地質観察に関する研究

室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

早野 明

2017 年 9 月

要 旨

地層処分事業の地下施設建設では、坑道掘削直後の露出岩盤を対象にした地質観察（以下、「壁面観察」）を、すべての坑道に渡って実施することが想定されている。しかしながら、壁面観察は、調査員の目視観察を基本とする従来からの手法（以下、「従来手法」）によるため、取得できるデータの量や品質は、調査員のスキルに依存する。そのため、観察作業の省力化やデータ品質の平準化を実現できる効率的な手法が望まれている。その手法の一助として、近年、計測対象物の 3 次元形状を表す点群を瞬時に取得できる、3 次元レーザスキャナ計測（以下、「レーザ計測」）の活用が有望視されている。しかしながら、点群から取得される壁面観察データと従来手法による観察結果を十分に比較した事例が存在しないため、点群から取得可能な情報や情報量について不明な点が多い。従って、レーザ計測を地層処分事業における壁面観察に適用可能かどうか、十分評価できていないのが現状である。

本研究では、地層処分事業における壁面観察の効率化のために、レーザ計測データである点群から壁面観察データを取得する方法を提案すると共に、壁面観察の役割や重要性を示し、最終的にレーザ計測の壁面観察への適用性を評価する。

まず、従来手法による壁面観察とレーザ計測が並行して実施された超深地層研究所計画のデータセットを用いて、点群から壁面観察データを取得する方法の検討と壁面観察データの取得を行った。そのデータと従来手法による観察結果を比較して、点群に基づく壁面データの品質と壁面観察の効率化への寄与について検証した。次に、地層処分事業の母岩選定に係わる水理場に着目した適性評価の方法論を整理し、岩盤の遅延性能評価の試行や地質構造モデル構築の事例から、壁面観察の役割や重要性を明らかにし、レーザ計測の地層処分事業への適用性を確認した。

以上の結果、点群の構成要素であるレーザ光の反射強度を示す画像の解析により、坑道壁面の岩相や変質程度を分類する方法と、坑道壁面形状を表す画像から割れ目分布データを取得する方法を見出した。点群に基づく壁面観察データは従来手法による観察結果を概ね再現しており、特に、変質帯や透水性割れ目を効果的に検出できることがわかった。よって、レーザ計測の適用が、観察作業の省力化と同時に取得データの品質の平準化に寄与することを確認した。さらに、水理場に着目した適性評価の方法論を整理した結果、壁面観察は、地質構造モデルの精緻化のためだけでなく、水理特性評価のためにも有用であることがわかった。すなわち、壁面観察により透水性割れ目を検出できれば、母岩の水理特性評価に大きな影響を与える割れ目の透水量係数分布の不確実性を低減できる。この観点からも、レーザ計測の有用性を示すことができた。

Efficient Shaft and Gallery Wall Mapping using Three-Dimensional Laser Scanning for Geological Disposal Program

Akira HAYANO

For repository construction related to the Japanese geological disposal program, geological mapping of shafts and gallery walls will be conducted over long distances. However, the quality and amount of geological data acquired using traditional techniques such as visual observations of researchers and simple orientation measurements using a clinometer depend on the researcher experience and skill. Therefore, efficient techniques must achieve high data quality, but with low labor usage. Three-dimensional (3D) laser scanning, which can instantly acquire point clouds representing the 3D shape of an object surface, can resolve these difficulties. However, the quality of geological data obtained from point clouds remains unclear. Consequently, the applicability of 3D laser scanning to geological mapping for the geological disposal program cannot be evaluated. This study was undertaken to raise geological mapping efficiency for the geological disposal program.

First, methods to obtain geological data from point clouds were developed using the geological mapping dataset compiled in parallel with 3D laser scanning of the Mizunami underground research laboratory project. Then geological data were obtained using the developed methods. The geological data from point clouds were compared to geological data obtained using traditional techniques to verify the quality of geological data from point clouds and their contribution to efficient geological mapping. Then, a methodology was constructed for evaluating the suitability of host rock of the underground facility. It was organized considering hydrologic conditions. The importance and role of geological mapping were emphasized based on results of nuclide migration analysis and geological model construction. Finally, this study evaluated the applicability of 3D laser scanning to geological mapping of the geological disposal program.

Two methods to obtain geological data from point clouds were identified from results of this study. One method maps the lithofacies and alteration zone on reflection intensity image analysis. Another method extracts fracture data by interpretation of images showing the wall surface shape. Geological data obtained from the point cloud can reproduce most geological data obtained using traditional techniques. Especially, water-conducting features and the alteration zone can be extracted effectively. Actually, geological mapping is important for updating of geological models and for reducing the uncertainty of the transmissivity distribution, which is a hydraulic parameter. From this viewpoint, the usability of 3D laser scanning is clear.

目 次

要旨

| | |
|---|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 1.1 地層処分事業の坑道壁面の地質観察とその効率化の必要性 | 1 |
| 1.1.1 地層処分事業において建設される処分場の概要 | 1 |
| 1.1.2 地層処分事業の調査と処分場建設地選定の段階と壁面観察の位置付け | 3 |
| 1.1.3 地層処分事業における壁面観察の効率化の必要性 | 5 |
| 1.2 レーザ計測の壁面観察への適用の動向と課題 | 7 |
| 1.3 研究目的と論文構成 | 15 |
| 参考文献 | 17 |
| 2. 反射強度画像の画像解析による坑道壁面の岩相マッピング | 21 |
| 2.1 背景 | 21 |
| 2.2 瑞浪研究所の立坑におけるレーザ計測の概要 | 21 |
| 2.3 瑞浪研究所の主立坑周辺の地質概要 | 26 |
| 2.4 反射強度画像の画像処理による岩相マッピングの方法と結果 | 28 |
| 2.4.1 花崗岩を対象にした岩相マッピングの方法と結果 | 29 |
| 2.4.2 堆積岩を対象とした岩相マッピングの方法と結果 | 32 |
| 2.5 まとめ | 34 |
| 参考文献 | 35 |
| 3. レーザ計測データの坑道壁面の割れ目観察への適用性 | 37 |
| 3.1 背景 | 37 |
| 3.2 瑞浪研究所の地質概要と本研究の対象範囲 | 39 |
| 3.3 レーザ計測の概要と点群の前処理 | 41 |
| 3.4 割れ目観察の概要と点群に基づき取得する割れ目の属性情報 | 44 |
| 3.5 点群に基づく割れ目データの取得方法 | 46 |
| 3.5.1 坑道壁面に分布する割れ目の抽出方法 | 47 |
| 3.5.2 抽出した割れ目の属性情報の取得方法 | 53 |
| 3.6 結果 | 54 |
| 3.7 考察 | 59 |
| 3.7.1 点群に基づく割れ目の属性情報の再現性と割れ目の特徴の関係 | 59 |
| 3.7.2 地質構造モデルの構築および水理解析への影響 | 64 |
| 3.8 まとめ | 67 |
| 参考文献 | 68 |
| 4. 地層処分事業における坑道壁面の地質観察の重要性 | 72 |
| 4.1 背景 | 72 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2 | 目的と実施内容..... | 75 |
| 4.3 | 水理の観点から母岩の適性を評価するための指標..... | 75 |
| 4.4 | 水理の観点から母岩の適性を評価するために必要な地質調査データ..... | 78 |
| 4.4.1 | 評価ツリーの概要..... | 78 |
| 4.4.2 | 評価ツリーに基づく地下水移行時間の評価に必要な地質データ..... | 82 |
| 4.5 | 地下水移行時間の評価と壁面観察の関係とその重要性..... | 94 |
| 4.5.1 | 事例 1：新第三紀塊状珪質泥岩に分布する層理面に平行な断層と それに斜交する断層の交差関係 | 94 |
| 4.5.2 | 事例 2：ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法..... | 100 |
| 4.6 | まとめ..... | 116 |
| | 参考文献..... | 117 |
| 5. | 地層処分事業における壁面観察へのレーザ計測の適用性..... | 128 |
| 5.1 | レーザ計測の壁面観察の効率化への寄与..... | 128 |
| 5.1.1 | 観察時間の短縮への寄与..... | 129 |
| 5.1.2 | 観察区間毎のデータ品質の平準化への寄与..... | 130 |
| 5.1.3 | データ取得精度の低下の防止の維持..... | 131 |
| 5.2 | レーザ計測の地層処分事業における壁面観察への適用性..... | 131 |
| | 参考文献..... | 137 |
| 6. | 総括..... | 138 |
| 6.1 | 1 章から 5 章のまとめ..... | 138 |
| 6.2 | 今後の課題..... | 140 |
| | 謝辞..... | 142 |

図一覧

| | |
|--|----|
| 図 1.1.1-1 地層処分の概念図 | 2 |
| 図 1.1.1-2 地層処分事業において想定されている処分場レイアウトの例..... | 3 |
| 図 1.1.2-1 地層処分事業におけるサイト選定プロセス..... | 5 |
| 図 1.1.3-1 坑道壁面の地質観察の例..... | 7 |
| 図 1.2-1 レーザ計測により取得されるデータの構成..... | 11 |
| 図 1.2-2 法面を対象としたレーザ計測により取得された反射強度画像の例..... | 11 |
| 図 1.2-3 トンネルを対象としたレーザ計測により取得された反射強度画像..... | 12 |
| 図 1.2-4 トンネルを対象としたレーザ計測データに基づく割れ目抽出の例..... | 12 |
| 図 1.2-5 トンネルの切羽を対象としたレーザ計測と 3次元モデルにおける不連続面抽出の例 | 13 |
| 図 1.2-6 数メートルスケールの露頭を対象としたレーザ計測の例..... | 13 |
| 図 1.2-7 TIN とその構成要素の法線ベクトルの比較の例 | 13 |
| 図 1.2-8 Discontinuity Analysis(DiAna)によるボックス分割のイメージ..... | 14 |
| 図 1.2-9 DiAna における点群のボックス分割とフィッティングによる面の生成の概念 | 14 |
| 図 1.2-10 PlaneDetect による割れ目抽出の例..... | 15 |
| 図 1.3-1 本論文の構成 | 17 |
| 図 2.2-1 瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウトとレーザ計測の実施範囲 | 24 |
| 図 2.2-2 主立坑におけるレーザ計測概要とスキャナ本体の主な仕様 | 24 |
| 図 2.3-1 瑞浪研究所の主立坑および換気立坑に分布する地質層序概要..... | 27 |
| 図 2.3-2 主立坑と交差する NNW 走向の断層の概要 | 28 |
| 図 2.4.1-1 土岐花崗岩（深度 189.6m～192.0m）における岩相マッピング..... | 31 |
| 図 2.4.1-2 各岩相の代表的な箇所の切り出しと濃度値頻度分布（花崗岩） | 32 |
| 図 2.4.2-1 瑞浪層群（深度 108.5m～110.4m）における岩相マッピング | 33 |
| 図 2.4.2-2 濃度値頻度分布（堆積岩） | 34 |
| 図 3.2-1 瑞浪超深地層研究所の立坑と水平坑道のレイアウトと深度 300m 研究アクセス 坑道における割れ目 | 41 |
| 図 3.3-1 水平坑道におけるレーザ計測の模式図..... | 43 |
| 図 3.3-2 点群の構成と点群の処理..... | 44 |
| 図 3.4-1 坑道壁面の表面形状..... | 46 |
| 図 3.5-1 レーザ計測の実施から割れ目データ取得までの手順..... | 47 |
| 図 3.5.1-1 馬蹄形の点群の x' y' 平面への展開方法..... | 50 |
| 図 3.5.1-2 ArcGIS の地形分析ツールを用いた割れ目を抽出するための画像生成の手順 | 50 |
| 図 3.5.1-3 観察区間の割れ目マッピングの結果..... | 52 |
| 図 3.5.2-1 抽出された割れ目に対応する点群にフィットする面..... | 54 |
| 図 3.6-1 割れ目のトレースマップ..... | 56 |
| 図 3.6-2 調査員が観察した割れ目のトレース長に対する判読画像から抽出した割れ目の トレース長の割合のヒストグラム | 57 |
| 図 3.6-3 調査員が計測した割れ目方位と点群へのフィッティングにより求めた | |

| | |
|---|-----|
| 割れ目方位の差（二つの面の法線のなす角）の概念..... | 57 |
| 図 3.6-4 調査員が計測した割れ目方位と点群に基づく 割れ目方位の法線がなす角の頻度図..... | 58 |
| 図 3.6-5 ステレオネット投影した割れ目方位 | 58 |
| 図 3.7.1-1 割れ目のトレース長の頻度図（なす角別） | 62 |
| 図 3.7.1-2 割れ目の充填鉱物の幅の頻度図（なす角別） | 63 |
| 図 3.7.1-3 グラウトが介在する割れ目の割合（なす角別） | 64 |
| 図 3.7.2-1 坑内ボーリング調査と坑道壁面の割れ目観察に基づく 300m 研究アクセス坑道周辺の割れ目の分布 | 66 |
| 図 3.7.2-2 300m 研究アクセス坑道に分布する湧水割れ目の頻度と透水量係数の分布 | 66 |
| 図 4.1-1 母岩の選定ならびに処分場設置可能領域の設定の流れ | 74 |
| 図 4.3-1 水理特性に関する評価指標の概念図 | 78 |
| 図 4.4.1-1 評価ツリーの整備手順 | 81 |
| 図 4.4.1-2 評価ツリーの基本構成 | 82 |
| 図 4.4.2-1 地下水移行時間に関する評価ツリーの概略図 | 88 |
| 図 4.4.2-2 地下水移行時間に関する評価ツリー（一次元モデルを用いた解析の場合） | 89 |
| 図 4.4.2-3 地下水移行時間に関する評価ツリー （三次元の水理地質構造モデルを用いた解析の場合） | 90 |
| 図 4.4.2-4 3 次元水理地質構造モデルを用いた解析に関する評価ツリー | 91 |
| 図 4.4.2-5 多孔質媒体モデル（CPM モデル）に関する評価ツリー | 92 |
| 図 4.4.2-6 個別亀裂ネットワークモデル（DFN モデル）に関する評価ツリー | 93 |
| 図 4.5.1-1 幌延地域の地質図と NE-SW 方向の地質断面図 | 95 |
| 図 4.5.1-2 幌延 URL のレイアウトと断層の写真 | 96 |
| 図 4.5.1-3 幌延 URL において観察された割れ目の分布 | 98 |
| 図 4.5.1-4 幌延 URL の換気立坑において観察された層面断層 | 99 |
| 図 4.5.1-5 層面断層の分布を示した鉛直断面図 | 99 |
| 図 4.5.2-1 最大線量の移行距離に対する変化 | 102 |
| 図 4.5.2-2 総合性能評価の枠組みと個別研究テーマの関係 | 103 |
| 図 4.5.2-3 1 次元平行平板モデルの概念図 | 106 |
| 図 4.5.2-4 透水性割れ目と透水量係数の算出方法 | 109 |
| 図 4.5.2-5 FEC 検層結果に基づく流入点の透水量係数分布（ケース 1） | 110 |
| 図 4.5.2-6 FEC 検層の流入点の透水量係数と BTV 検層の結果に基づく 割れ目の透水量係数分布（ケース 2） | 110 |
| 図 4.5.2-7 水理試験結果と BTV 検層結果に基づく割れ目の透水量係数分布(ケース 3) | 111 |
| 図 4.5.2-8 透水量係数の ϕ_{out}/ϕ_{in} に対する感度 | 114 |
| 図 5.1-1 点群の構成要素と取得できる地質データの関係 | 129 |
| 図 5.2-1 FPC および EFPC を適用するために比較的大きな割れ目を検出するための 調査プログラムの案 | 135 |
| 図 5.2-2 FPC の概要 | 136 |

| | | |
|---------|-----------------------------------|-----|
| 図 5.2-3 | SR-Site における FPC と EFPC の概要 | 136 |
| 図 5.2-5 | 処分場の建設のイメージ | 137 |

表一覧

| | | |
|-----------|---|-----|
| 表 2.2-1 | リーグル社製の LMS-Z360i の仕様..... | 25 |
| 表 4.1-1 | 地下施設設置位置の設定のための評価項目の例..... | 74 |
| 表 4.3-1 | 母岩の核種閉じ込め性能の観点から利用可能と考えられる水理特性に関する 評価指標の例..... | 77 |
| 表 4.4.1-1 | 評価ツリーに使用するボックス一覧..... | 82 |
| 表 4.5.2-1 | 本研究の対象となる調査項目とデータ..... | 108 |
| 表 4.5.2-2 | 透水性割れ目と透水量係数の算出方法..... | 109 |
| 表 4.5.2-3 | 透水量係数分布以外のパラメーター一覧..... | 111 |
| 表 4.5.2-4 | 解析結果一覧..... | 113 |

第 1 章 序論

1.1 地層処分事業の坑道壁面の地質観察とその効率化の必要性

1.1.1 地層処分事業において建設される処分場の概要

高レベル放射性廃棄物の最終的な処分では、廃棄物を極めて長期間にわたり人間の生活環境から遠ざける必要があり、世界的に共通認識として最も現実的で有力な処分方法は、廃棄物を地下深くの安定な地層中に埋設する‘地層処分’である（原子力環境整備促進・資金管理センター，2017）。わが国においては、2000 年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が制定され、同年 10 月に地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan, 以下、「NUMO」）が設立された。原子力発電から発生する使用済燃料の再処理の過程で再利用できないものとして残る高レベル放射性廃液は、ガラスで固化された後、人工バリア（オーバーパックと呼ばれる鉄製の容器と緩衝材と呼ばれる閉め固めた粘土）に覆われ、それを 300m よりも深い地層または岩体に定置されることが法令で定められている（図 1.1.1-1）。地層処分では、人工バリアだけでなく地層が本来もっている能力を利用する多重バリアシステムにより、放射性物質を長期間にわたり封じ込め、人間の生活環境から隔離することをコンセプトとしている。

わが国において既に発生したガラス固化体の量は、各地の原子力発電所に保管してある使用済燃料をすべて再処理し、ガラス固化体にしたと仮定し、すでに国内外の工場においてガラス固化体になっているものと合わせて、約 25,000 本分である（NUMO ホームページ，http://www.numo.or.jp/q_and_a/faq/faq100008.html）。また、NUMO は、国の定めた特定放射性廃棄物の最終処分計画（通商産業省，2000）に基づき、年間 1,000 本のガラス固化体を処分する処分場の規模と処分費用の関係を考慮して、ガラス固化体を 40,000 本以上処分できる地下施設を一つのサイトに建設することにしている（NUMO, 2004）。40,000 本のガラス固化体を埋設できる処分場の坑道総延長は、処分場が沿岸部なのか内陸部なのか、対象となる岩盤が硬質系岩盤なのか軟質系岩盤なのか、廃棄体の定置方式が縦置きなのか横置きのかなど、様々な要因によって大きく異なるが、200 から 300km になることが想定されている（図 1.1.1-2）（NUMO,

2004 ; NUMO, 2009)。

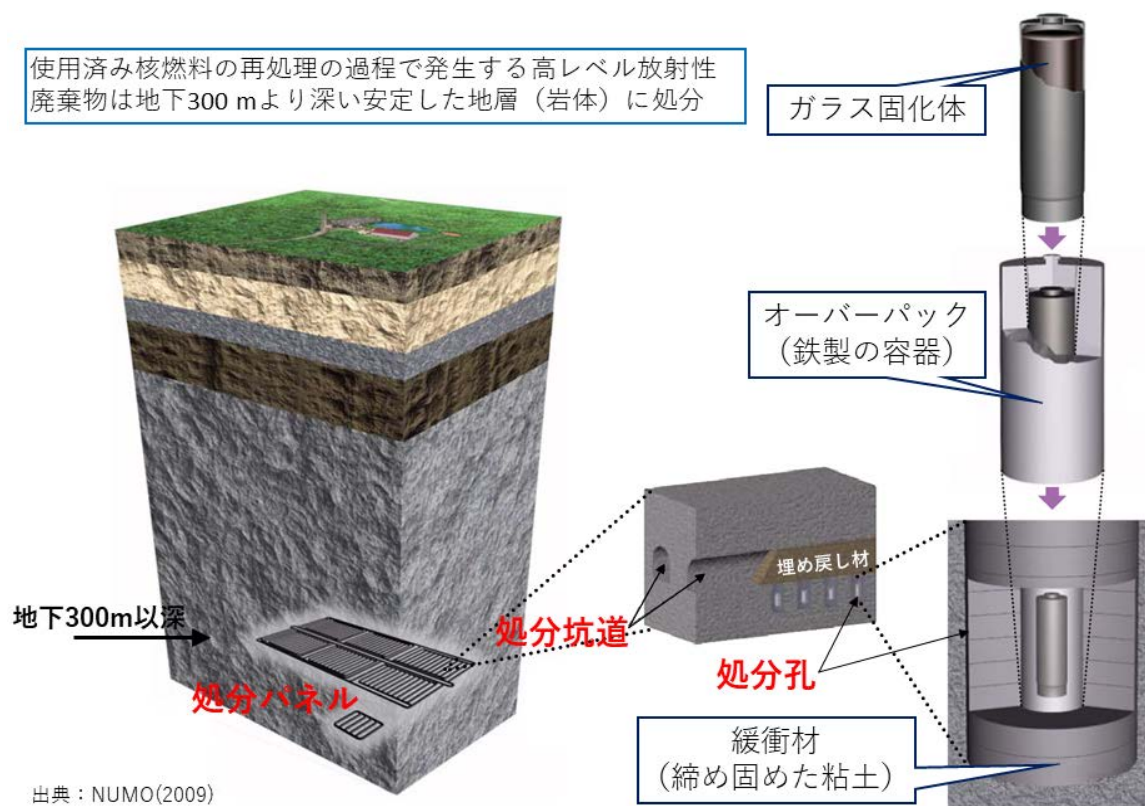


図 1.1.1-1 地層処分の概念図（NUMO, 2009 を編集）

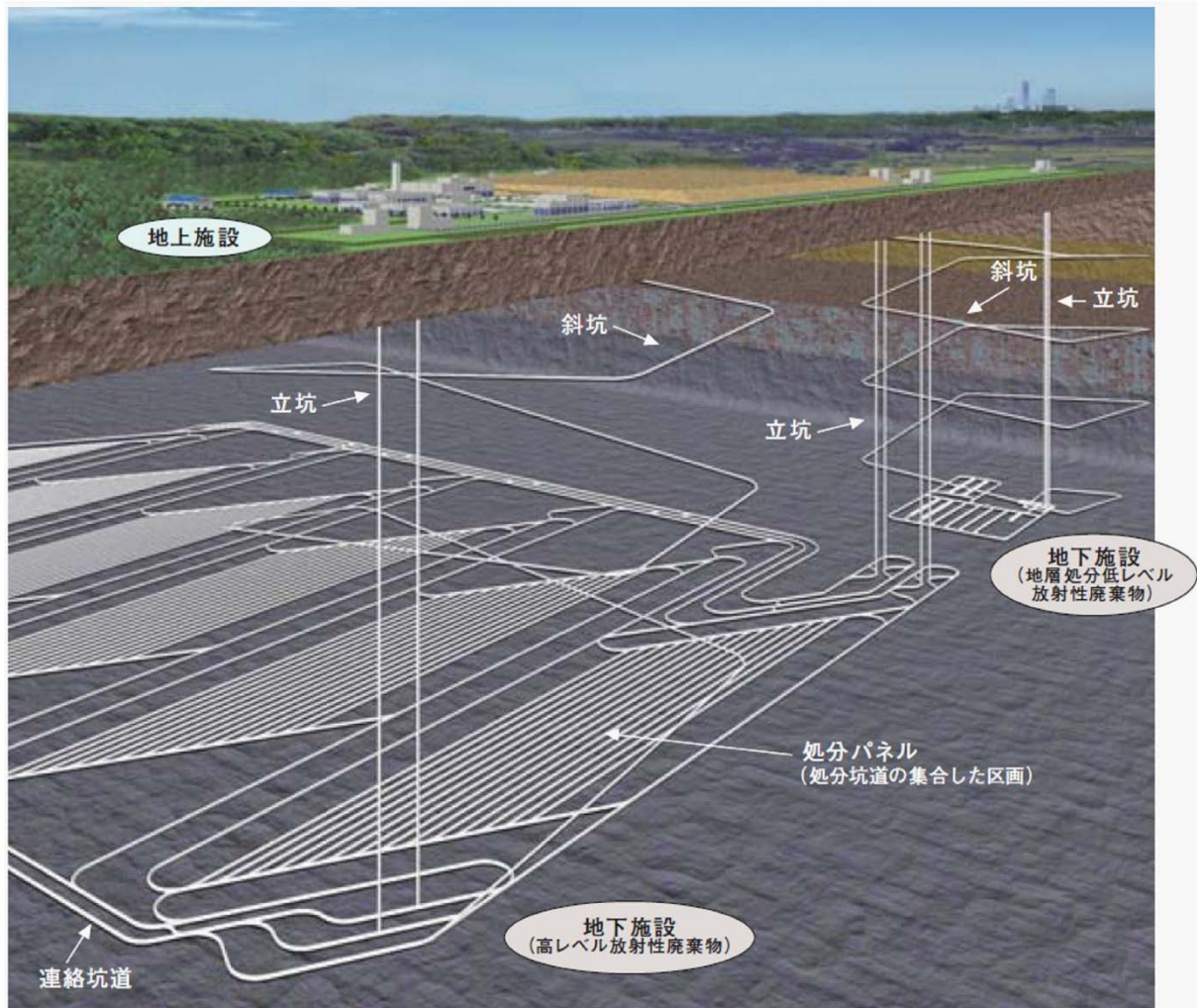


図 1.1.1-2 地層処分事業において想定されている処分場レイアウトの例
(NUMO, 2009)

結晶質岩，深度 1000 m の場合のレイアウトを示す。この場合，約 3 km×2 km の広さで，すべての坑道の総延長は，約 270 km になることが想定されている。

1.1.2 地層処分事業の調査と処分場建設地選定の段階と壁面観察の位置付け

地層処分事業の処分場建設地（以下，サイト）の選定のプロセスは，「概要調査地区の選定」，「精密調査地区の選定」，「最終処分施設建設地の選定」の三段階の選定過程を経て，処分施設建設地が決定される。この三つの選定に対してそれぞれ文献調査，概要調査，精密調査の結果に基づき行われる（図 1.1.2-1）。文献調査では，地質環境の長期安定性に関わる断層活動，隆起・侵食や火山活動などの天然現象，処分場建設の可否に関わる岩盤の情報，人間侵入の動機となる地下資源の有無の観点からサイトとして不適切な地域をあらかじめ除外することを目的として，地質図，活断層分布図，空中写真，論文/報告書などの既

存の文献情報に基づく調査が行われる（NUMO，2011）。概要調査では，文献調査によって候補になった場所からサイトとしてより好ましい場所（精密調査を実施する場所）を選定することを目的として，地表踏査，物理探査およびボーリング調査の地上からの調査が実施される（NUMO，2011）。精密調査では，概要調査よりも高精度かつ緻密な地表からの調査を実施した後，地下の調査坑を設けて，岩盤の力学・水理学的物性や地下水の地球化学的特性を把握するための試験が実施される（NUMO，2011）。これらの三つの調査の期間は20年間程度と見込まれており，調査対象となる地域が未だ決まらず調査が開始されていない現段階においては，具体的な調査の実施内容の検討は，精密調査地区選定段階（概要調査）が中心であり，精密調査以降についてはほとんど検討されていない。そのため，精密調査後半の調査坑の掘削時や処分場建設段階の坑道掘削において，坑道壁面の地質観察（以下，「壁面観察」）を実施するかどうかは，明確に示されていないが，壁面観察も重要な調査項目の一つである。例えば，既存の地下発電所などの大規模な地下空洞の設計では，割れ目の卓越方位に対して坑道の軸方向を直交させるように坑道を配置することが空洞の力学的安定性の観点から望ましいとされている（電力土木技術協会，1988）。それと同様に，処分坑道群である処分パネル（図 1.1.1-1,2）の規模や数の検討には，割れ目の頻度や位置，長さ，幅，方向などの空間的な分布の情報を考慮する必要がある。さらに，地下施設を建設し廃棄体を埋設する対象となる岩体または地層である母岩の処分場としての適性を評価する際には，処分坑道あるいは処分孔（図 1.1.1-1）が，放射性核種の遅延性能に影響を及ぼすような割れ目がどの程度、どの位置で交差しているかといった情報が重要となる。つまり，水理の観点での評価に応じて，影響の大きい高い透水性を有する割れ目帯や断層破碎帯が分布する場合，処分パネルや処分坑道，処分孔の設置位置をそれらから遠ざけるといった対策を施すことになる（NUMO，2004；NUMO，2011）。地層処分事業の調査において割れ目の空間的な分布に関する情報は，概要調査や精密調査の前半に実施されるボーリング調査でも取得可能である。しかしながら，精密調査後半の調査坑道や処分場建設時の処分坑道の掘削時に壁面観察を実施することは，ボーリング孔よりも坑道の方が観察する面積が大きいため，より詳細に多くの割れ目情報を取得できる点で有利である。さらには，廃棄体の直

近である処分孔および処分坑道の壁面観察の実施により，実際に処分坑道などの交差する割れ目の特徴が処分場建設前の予測結果の許容範囲内にあるか確認することが可能になり，ひいては処分システムの性能評価の信頼性向上につながる。壁面観察の実施は，主にボーリング孔からの取得した割れ目情報から構築される地質構造モデルを更新し，評価結果の不確実性低減あるいは信頼性向上のために必要である。

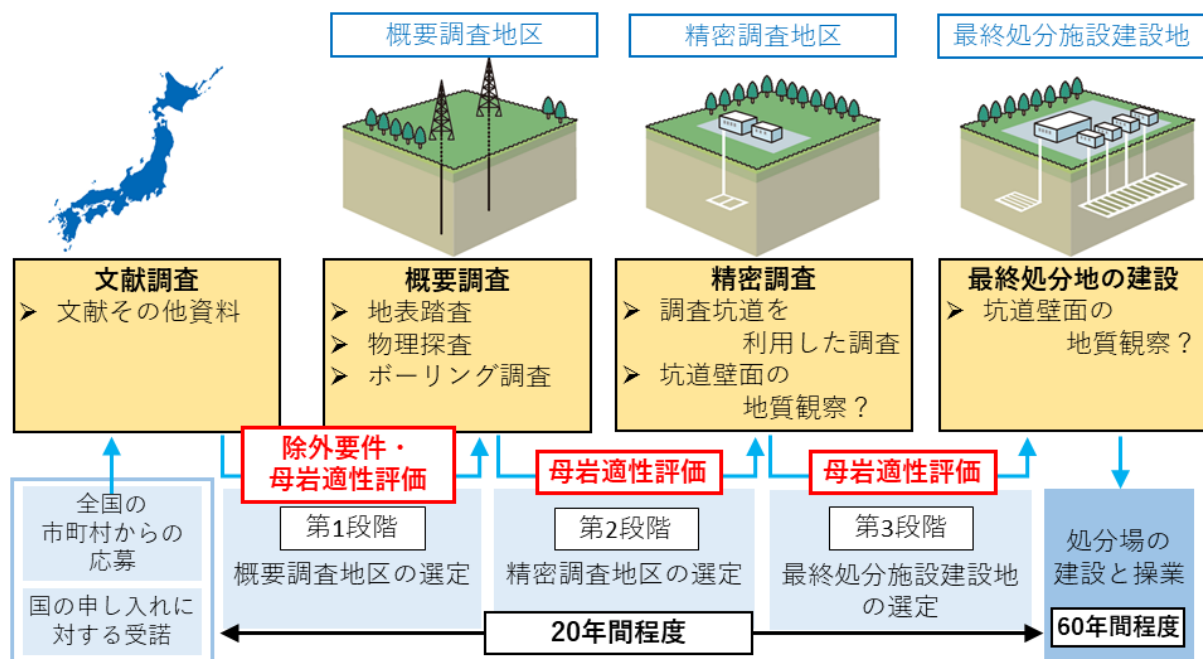


図 1.1.2-1 地層処分事業におけるサイト選定プロセス

（NUMO，2009；資源エネルギー庁ホームページに基づく）

ここでの母岩とは，処分場の地下施設が建設され，廃棄体が埋設される岩体あるいは地層のことである。また，母岩適性評価とは，候補となる母岩を選定するために，地質環境モデルや地質環境特性の長期変遷に関する情報に基づいて母岩としての適性を評価することである。

1.1.3 地層処分事業における壁面観察の効率化の必要性

地層処分事業のみならず石油・天然ガスの備蓄などの大規模な地下施設建設プロジェクトにおける坑道掘削時に行われる壁面観察の手法は，図 1.1.3-1 に示すように，坑道壁面における岩相や割れ目の分布が調査員の目視観察によるマッピングや写真撮影によって記録され，さらに，層理面や割れ目などの方位がクリノメーター（傾斜計と水準器が組み込まれた方位磁石）を使用して簡易的に測定されるといったように，従来からの手法（以下，「従来手法」）が今日

においても一般的である。もし、地層処分事業のように総延長 200 km 以上におよぶ坑道掘削(図 1.1.1-2)において従来手法による壁面観察を実施する場合、それは長期間、昼夜問わず実施され、膨大な回数になると予想されるため、以下の課題が生じることが懸念される。

- 建設コスト管理の観点から観察時間には制限時間が設けられることが予想され、制限時間内に処分場レイアウトの検討や地層処分システムの性能評価などの要求品質(量と質)を満たすデータを取得できない可能性がある。
- 長期間、昼夜にわたって坑道掘削が行われる場合、壁面観察毎に調査員が異なることが予想されるが、データの品質は調査員の経験や能力などに依存するため、データ品質にバラつきが生じることが懸念される。
- 岩盤崩落や落石による労働災害の防止の観点から調査員の露岩部分への立入が制限されることがよくあり、調査員が岩盤に接近した目視観察やクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位測定を行うことができないため、データ取得精度が低下することが懸念される。

これらの課題を解決するために、壁面観察を効率化できる手法を用意する必要がある。

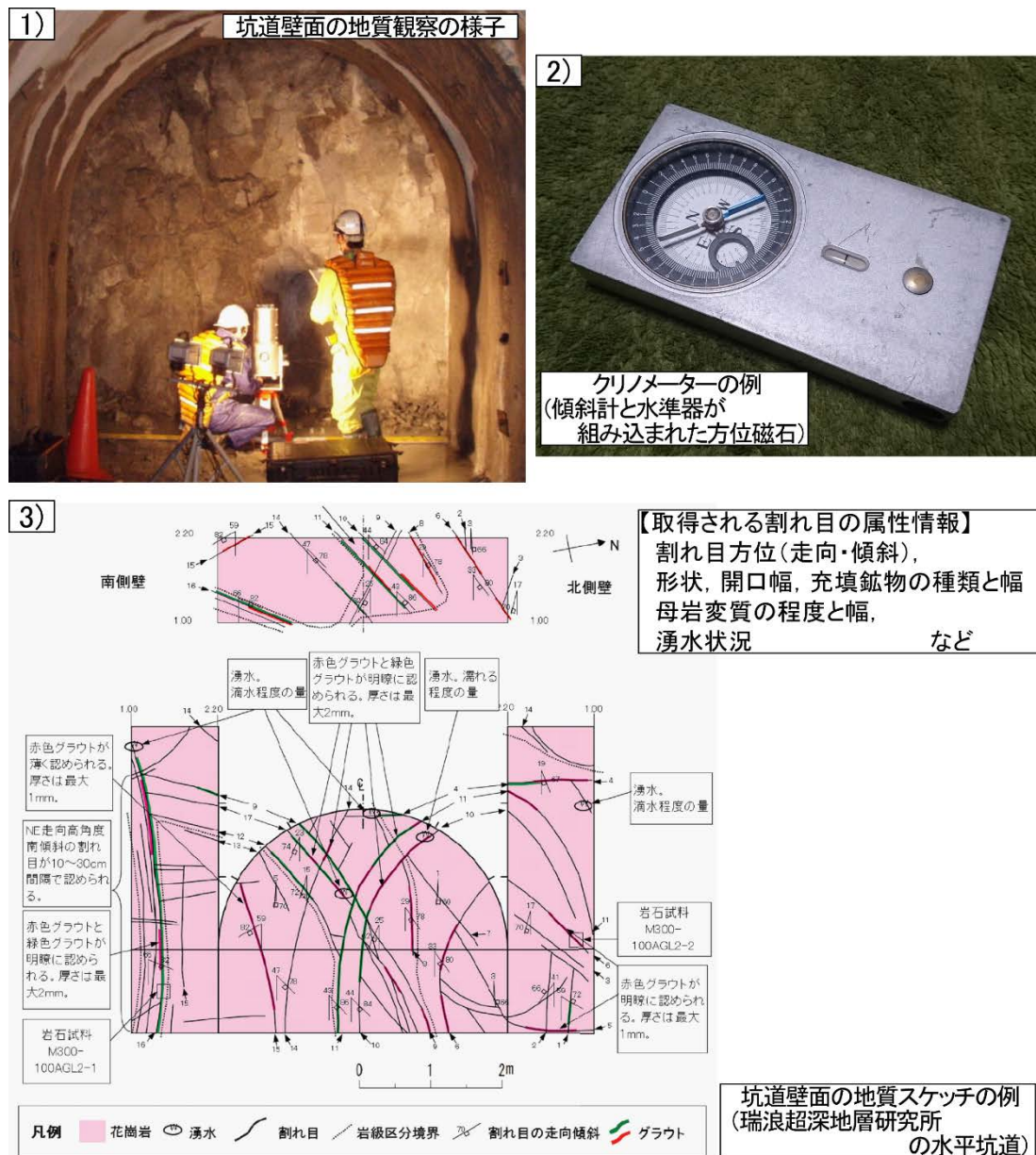


図 1.1.3-1 坑道壁面の地質観察の例

- 1) 瑞浪超深地層研究所の水平坑道における坑道壁面の地質観察(壁面観察)の様子を表す。
- 2) 割れ目の方位を計測する際に用いるクリノメーターの例を表す。
- 3) 壁面観察によって作成される坑道壁面の地質スケッチの例を示す。

1.2 レーザ計測の壁面観察への適用の動向と課題

レーザ計測の技術は, 従来リモートセンシングの分野で普及・進化してきた。1980 年以降, 地形や土地利用などに関する情報の取得を目的として人工衛星や航空機などに搭載されるセンサーとして採用されるようになり, 徐々にデータ解析技術やセンサーの性能が進歩し, 取得情報の高解像度化が急速に進んでい

る（高木・下田（監修），2004；早川・小口，2016）。そして，2000 年以降，地上型のレーザスキャナが徐々に普及し，建築物，橋梁，工場プラント，文化財などを対象とした三次元形状を記録するための計測に利用されている。さらに近年では，可能な限り調査員の目視観察に依らない効率的な調査手法の開発として，橋梁やトンネルのコンクリート壁面の定期点検や地質観察などの分野においても適用されている。

橋梁やトンネルのコンクリート壁面の定期点検の分野においては，従来，調査員による近接目視によって点検が行われてきたが，交通規制が生じることや，狭隘で暗い条件下で点検作業の結果，調査員ごとにバラつきや見落としが生じることが課題になっていた。その課題を解決するために，MMS（Mobile Mapping System）と MIS（Mobile Imaging System）を搭載した走行型トンネル点検車（MIMM（ミーム）あるいは MIMM-R）が開発された（例えば，塩崎ほか，2015；廣田ほか，2016；安田ほか，2016；水口ほか，2017）。MIMM-R には，道路周辺とトンネル覆工の 3 次元形状データを点群として取得し，コンター図の作成などにより変状箇所を検出するための 3 次元レーザスキャナ計測（以下，「レーザ計測」），トンネル覆工表面のひび割れ等，変状を連続的に撮影するための動画あるいは静止画の撮影，そして，覆工コンクリートの覆工厚や背面空洞の状態を探查するための非接触型レーダーの 3 つの計測機能が搭載されている。しかしながら，MIMM-R は，トンネル完成後のトンネル維持管理として覆工コンクリートの定期点検のために開発された技術であり，坑道掘削直後の露出した岩盤の地質観察を対象とする本研究の目的とは異なる。MIMM-R のような車両型の計測システムを坑道完成前の坑道掘削時の壁面観察にそのまま適用することはできないものの，これが搭載する個別の計測技術を地質観察に適用する手法を開発することが課題と言える。画像撮影は，従来手法による壁面観察においても，調査員が記録した地質スケッチをサポートするデータの取得として行われている。レーダー探查は，岩盤内部の情報を取得できることから，坑道壁面に分布する断層や大きな割れ目の深さ方向への広がりを推測するデータとして有効かもしれないが，岩盤表面の地質情報の取得を対象とすることに對しては用途外である。一方で，物体表面の 3 次元形状を瞬時にかつ高解像度で取得することが可能なレーザ計測は，MIMM-R が搭載する計測技

術の中で最も岩盤表面の地質情報の取得に向いている。レーザ計測の取得データの形式は、レーザ光の反射強度と物体表面の形状を表す 3 次元座標値から構成される点群であり（図 1.2-1）、レーザ光の反射強度から岩石の特徴を推定でき、三次元形状からは、岩盤表面に分布する断層や節理などの割れ目の分布を把握することができる。

これまでに、いくつかの既往研究によってレーザ計測を適用した割れ目観察手法の検討が行われた。例えば、道路や鉄道沿いの法面や崖地に露出する岩盤を対象とした計測（三戸ほか，2002；Lato *et al.*, 2009a; Lato *et al.*, 2009b; Sturzenegger and Stead, 2009; Lai *et al.*, 2014; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Assali *et al.*, 2014; Mah *et al.*, 2011）やトンネルにおける側壁や切羽を対象とした計測（Fekete *et al.*, 2010; Fekete and Diederichs, 2013, Wang *et al.*, 2009; 石濱ほか，2011）が行われた。

レーザ計測の取得データである点群の構成要素のうちレーザ光の反射強度では、岩相分布、断層や地層境界の分布あるいは湧水状況に関する情報を取得できる（三戸ほか，2002；Wang *et al.*, 2009; Fekete *et al.*, 2010）。三戸らは、近赤外線であるレーザ光の反射強度を表す画像により、地層境界や断層の分布が位置情報として取得でき、工事現場での地質観察やスケッチを省力化させる可能性を示した（図 1.2-2）。また、Fekete らは、十数メートルの長さのトンネルを対象としたレーザ計測を行い、吹き付けコンクリートからの湧水箇所が反射強度画像のコントラストにより検出可能であることを示した（図 1.2-3）。

一方、もう一つの構成要素である 3 次元座標値では、岩盤表面の 3 次元形状をモデル化し、層理面や割れ目面といった不連続構造を抽出し、その分布位置や方位を取得できることが示された（Lato *et al.*, 2009a; Lato *et al.*, 2009b; Sturzenegger and Stead, 2009; Lai *et al.*, 2014; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Assali *et al.*, 2014; Mah *et al.*, 2011; Fekete *et al.*, 2010; Fekete and Diederichs, 2013; 石濱ほか，2011）。例えば、Fekete らは、また、数 m から十数 m 規模の露頭や坑道を対象として、坑道形状の 3 次元モデルを作成し（図 1.2-4a）、目視により割れ目面だと判断できる箇所を抽出した（図 1.2-4b）。そして、調査員が計測した割れ目方位と点群の 3 次元座標から算出した割れ目方位を比較し、それぞれの卓越方位がほとんど一致すること

を確認した（図 1.2-4c）（Fekete *et al.*, 2010）。石濱らは、トンネル掘削時の切羽面を対象としたレーザ計測を実施し、点群の 3 次元座標を用いて各点を頂点とする TIN（Triangulated Irregular Network）を作成し、断層や割れ目などの不連続面をエリアとして任意に指定し、そのエリアを構成している各 TIN の走向傾斜をシュミットネットに投影し、その極大値を不連続面の方位（走向・傾斜）として求める方法（エリア法）を考案した（図 1.2-5）（石濱ほか, 2011）。Lato らは、数メートル程度の大きさの露頭を対象としたレーザ計測を実施し（図 1.2-6）、石濱らと同様に TIN を生成して、その各要素の法線ベクトルの方向に着目し、ほぼ同一方向のベクトルが隣り合い広い領域を形成する場合、それを割れ目面として抽出する方法を検討した（図 1.2-7）（Lato *et al.*, 2009）。Gigli らは、メッシュを作らずに点群を立方格子で分割して不連続面を推定する、Discontinuity Analysis(DiAna) と呼ばれるアルゴリズムを開発し（図 1.2-8）、MATLAB のツールを作成した（Gigli and Casagli, 2011）。DiAna では、はじめに点群を一定の大きさを持つ格子で分割する（図 1.2-9a）。つぎに各格子内の点に対し、最小二乗法で面をフィッティングする（図 1.2-9b）。さいごに、ある格子内の面の法線に対して、隣り合うの面の法線方向が類似している場合、それらは同一面であると判断し、それを不連続面として抽出する（図 1.2-9c）。Vöge らは、点群からメッシュを作成し、‘平滑化’、‘エッジ検出・マスキング’、‘破碎部検出・マスキング’、‘不連続面識別’ および ‘不連続面セットのクラスタリング’ の 5 つの処理を通して不連続面を検出する PlaneDetect と呼ばれるアルゴリズムを開発した（図 1.2-10）（Vöge *et al.*, 2013）。

以上のように、坑道壁面に分布する岩相、断層や割れ目などの地質構造、あるいは湧水状況に関する情報がレーザ計測によって取得できることが示されていることから、1.1.3 節で述べた課題の解決のためには、壁面観察にレーザ計測を適用することが有効であると考えられる。しかしながら、地質構造モデルの構築や地下水流動解析を前提としたデータ取得基準に基づく壁面観察が、広範囲にわたってレーザ計測と並行して実施された例が世界的にほとんど無い。そのため、世界的にみても希少である。既往研究では、数メートルから十数メートル程度の岩盤を対象として、主に割れ目データを取得できることが示されたが、点群から取得された壁面観察データと従来手法に基づく割れ目データを十

分に比較した事例は，著者の知る限り存在しないため，点群から従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか良く分かっていない。

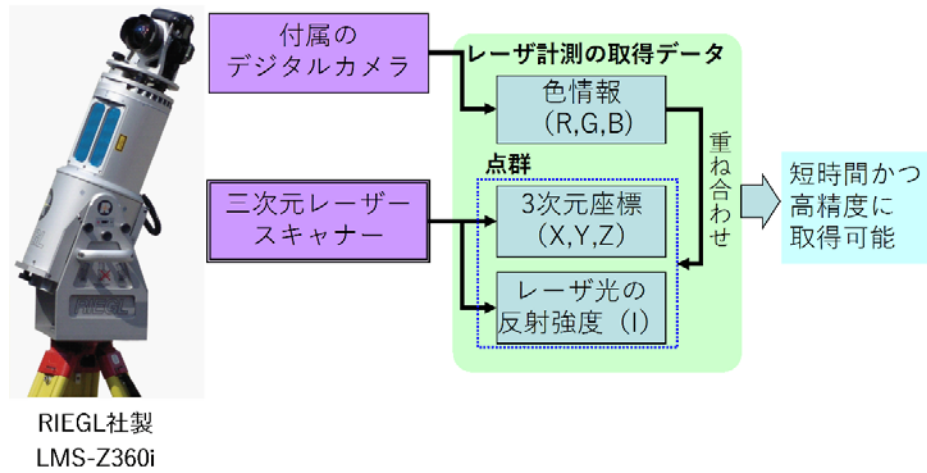
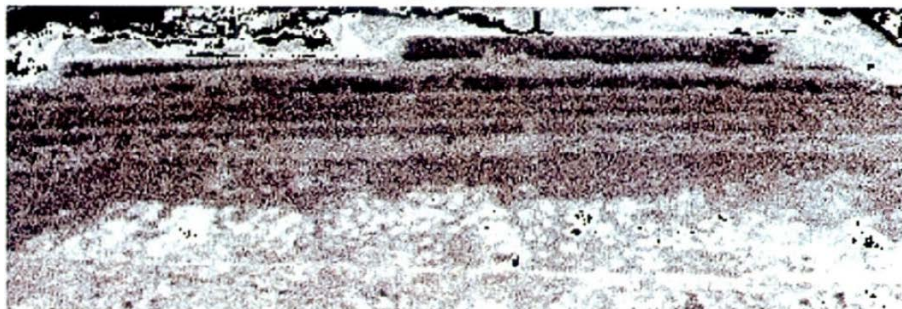


図 1.2-1 レーザ計測により取得されるデータの構成



写真画像



レーザー受光強度画像

* 下位より各礫化した安山岩質自破碎溶岩，これを被覆する暗色・淡色火山灰互層よりなる。

- ・ センサーから測定対象物までの距離→約40～80m
- ・ スキャンステップ角→80mmgonn(測点間隔6～12cm程度)
- ・ データ点数→60万点以下
- ・ のり高→10～15m程度
- ・ トレンチ長→約90m

図 1.2-2 法面を対象としたレーザ計測により取得された反射強度画像の例
(三戸ほか，2016)

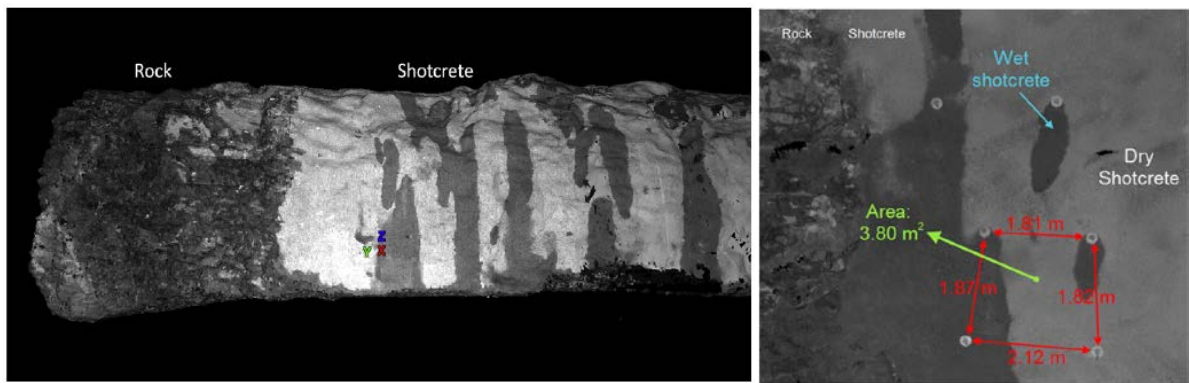


図 1.2-3 トンネルを対象としたレーザ計測により取得された反射強度画像 (Fekete *et al.*, 2010)

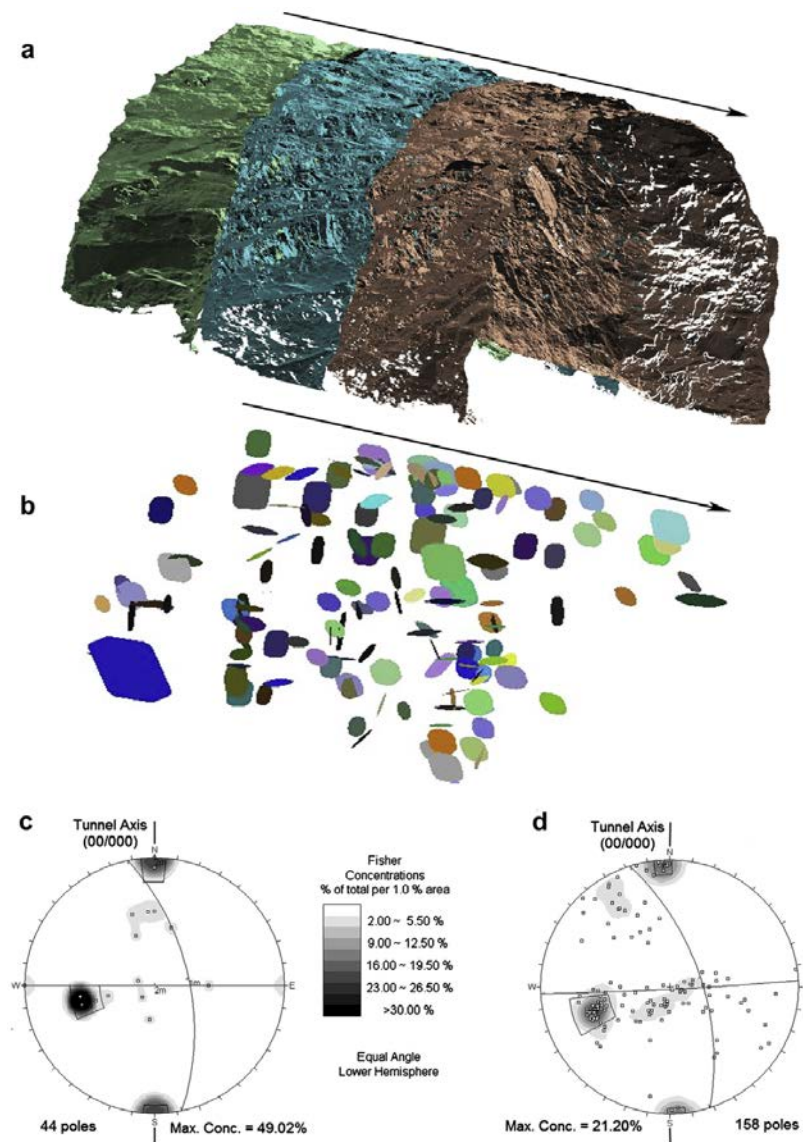


図 1.2-4 トンネルを対象としたレーザ計測データに基づく割れ目抽出の例 (Fekete *et al.*, 2010)

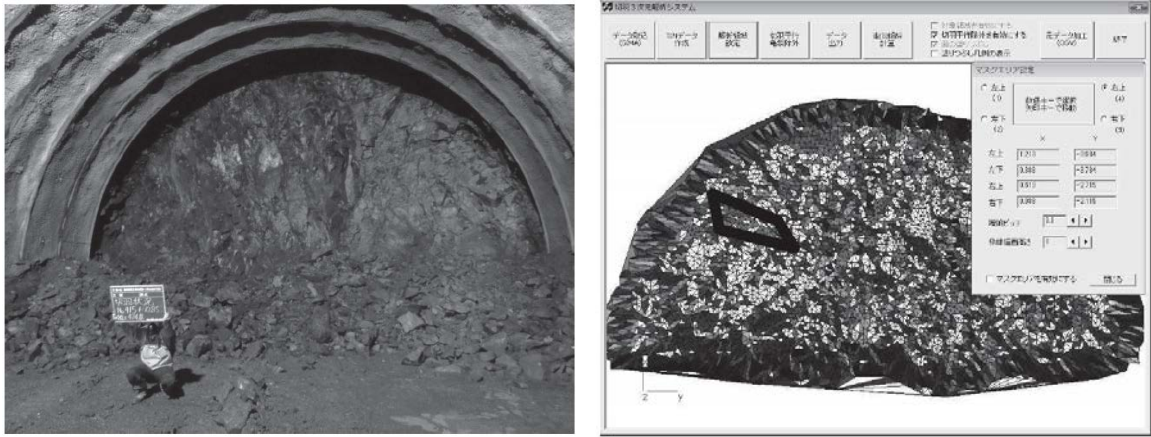


図 1.2-5 トンネルの切羽を対象としたレーザ計測と 3 次元モデルにおける不連続面抽出の例 (石濱ほか, 2016)

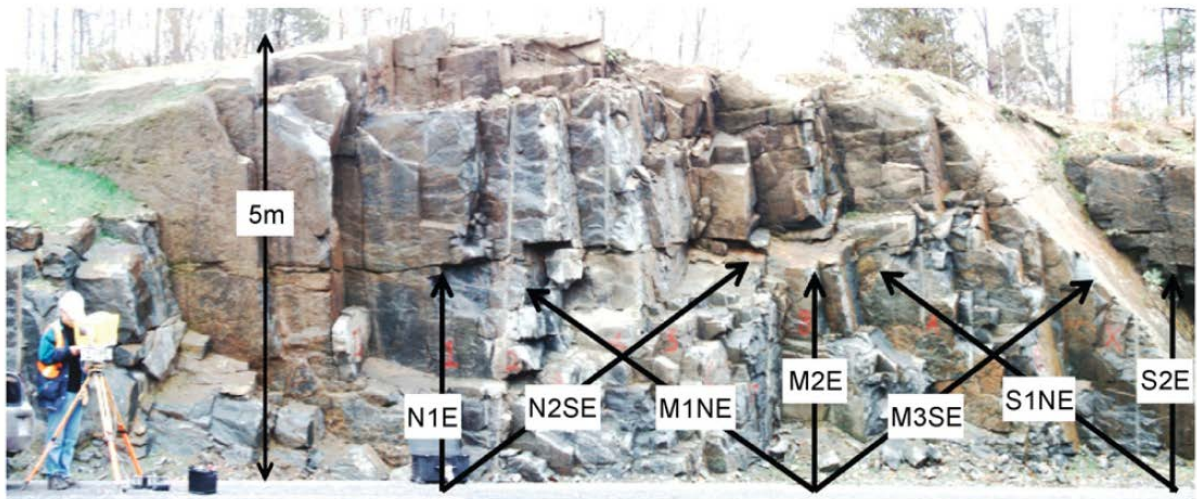


図 1.2-6 数メートルスケールの露頭を対象としたレーザ計測の例 (Lato et al.,2009b)

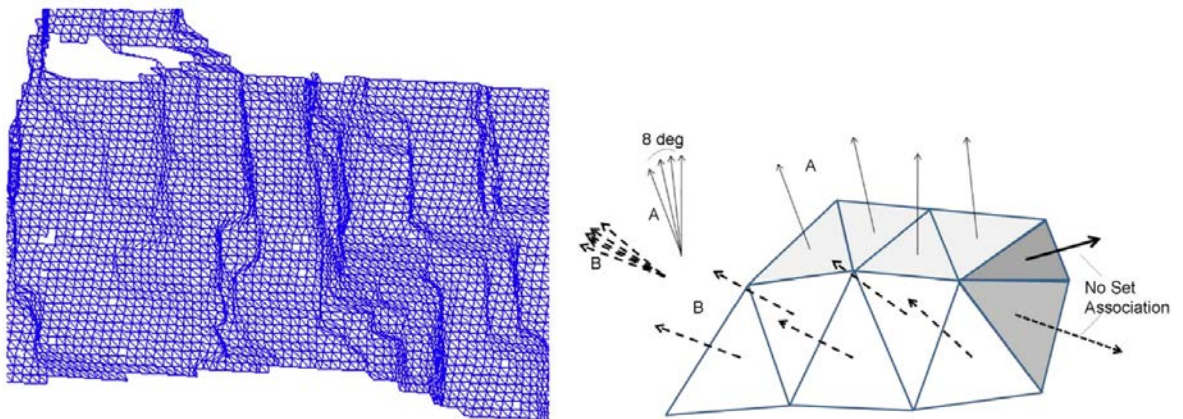


図 1.2-7 TINとその構成要素の法線ベクトルの比較の例 (Lato et al.,2009b)

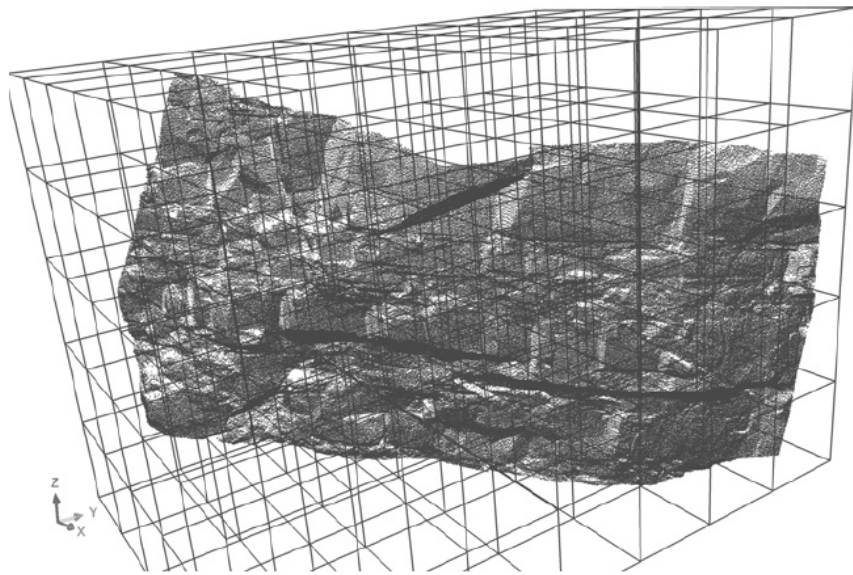


図 1.2-8 Discontinuity Analysis(DiAna)によるボックス分割のイメージ
(Gigli and Casagli, 2011)

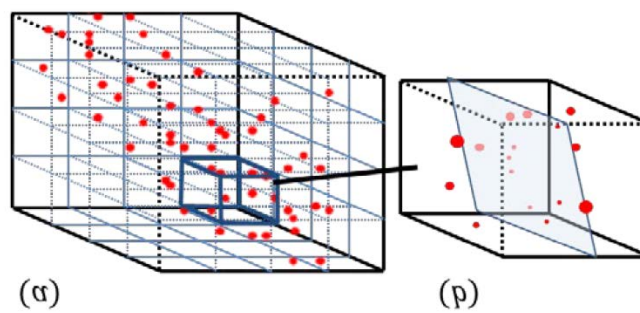
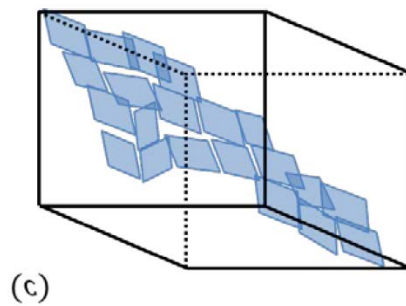


図 1.2-9 DiAna における点群のボックス分割とフィッティングによる面の生成の概念 (松川ほか, 投稿中)

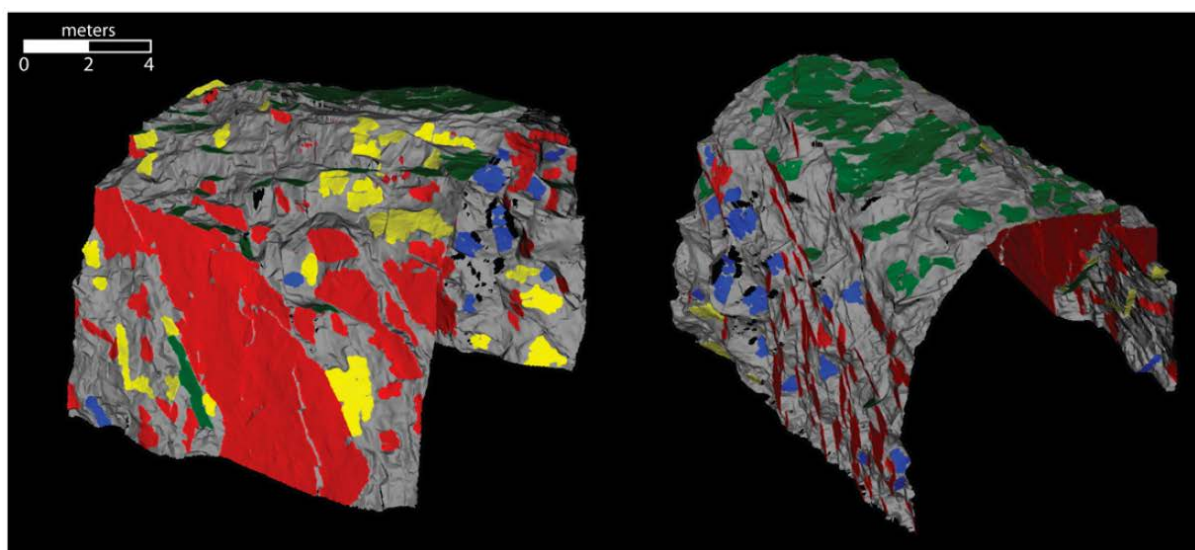


図 1.2-10 PlaneDetect による割れ目抽出の例（Vöge *et al.*, 2013）

1.3 研究目的と論文構成

図 1.3-1 に本論文の構成を示す。本研究では，高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の坑道掘削時に行われる壁面観察を効率化させることを目的として，はじめに，レーザ計測データである点群から壁面観察データを取得する方法を提案する。そして，国内外における地下研究施設の調査事例に基づき，地層処分事業における壁面観察の役割や重要性を示し，レーザ計測の壁面観察への適用性を評価する。本研究では，岐阜県瑞浪市にある国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency，以下，「JAEA」）の瑞浪超深地層研究所（以下，「瑞浪研究所」）において取得されたレーザ計測データを用いる。瑞浪研究所では，高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究のうち深地層の科学的研究の一環として，主に亀裂性岩盤である結晶質岩を対象とした調査坑道の掘削を伴う研究開発を行っている。調査坑道の掘削時には，覆工コンクリートを打設する前に，岩相や，断層や節理などの地質構造の分布の特徴を把握するために壁面観察がほぼ坑道全域にわたって行われている。そして，一部の坑道の壁面観察では，効率的な観察手法の開発を目的としてレーザ計測が行われている（鶴田・笹尾，2016）。このような地下の坑道を対象とした広範囲にわたるレーザ計測と並行した壁面観察は，世界的にみても希少である。第2章および第3章では，ここのデータを用いて，点群から壁面観察データを取

得する方法を提案する。第 2 章では、点群の構成要素のうちレーザ光の反射強度に基づき、坑道壁面における岩相や変質状況の分布を把握する方法について述べる。第 3 章では、点群の構成要素のうち形状データである 3 次元座標から坑道壁面に分布する断層や割れ目などの構造を抽出し、その属性情報を取得する方法について述べる。そして、点群から取得した壁面観察データを従来手法によるデータと比較し、点群から従来手法に基づく壁面観察データをどの程度再現できるのか評価する。第 4 章では、地層処分事業の母岩選定に係わる水理場に着目した適性評価の方法論を整理し、適性評価の試行や地質構造モデル構築の事例から、壁面観察の役割や重要性を明らかにする。具体的には、先に検討が進められている地層処分事業の概要調査を対象として、地表における物理探査、ボーリング調査などから取得される地質データや水理データと水理場に着目した適性評価における評価指標になり得る項目との関係を整理し、概要調査以降に実施される壁面観察の位置づけを明らかにする。その際、二つの事例により、壁面観察から得られる地質データの重要性を強調する。一つの事例は、新第三紀塊状珪質泥岩を対象とした地質構造の概念モデル構築である。もう一つの事例は、処分場周辺の数十から百メートル程度の範囲のニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能に着目した簡易的な適性評価の試行である。第 5 章では、地層処分事業の処分場建設時（坑道掘削掘削時）に想定される調査プログラムを示し、その壁面観察へのレーザ計測の適用可能性や観察作業の効率化への寄与について述べる。第 2 章から第 5 章までを総括し、今後の課題について述べる。

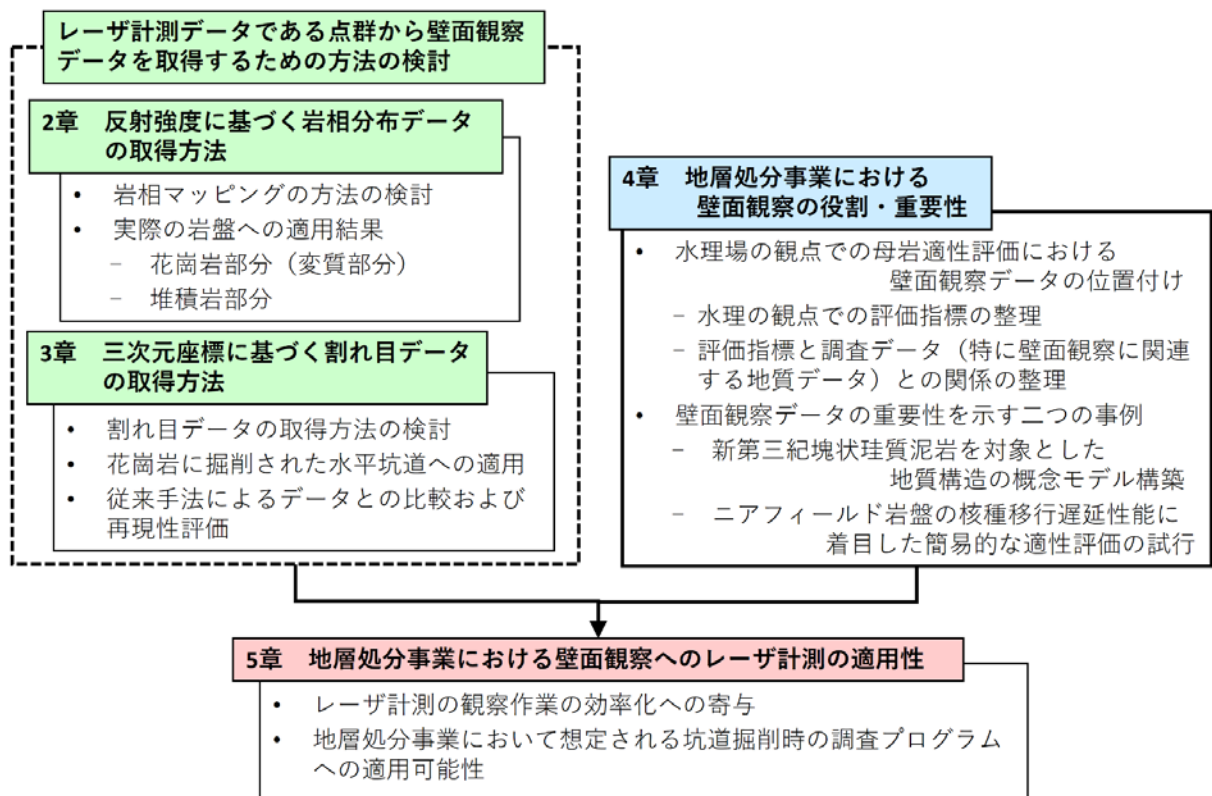


図 1.3-1 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., Viguiier, F. (2014): Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection, *Journal of Structural Geology*, Volume 66, Pages 102-114.
- 電力土木技術協会（1988）：電力地下施設の設計・施工．
- Fekete, S., Diederichs, M., Lato, M. (2010): Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 25, Issue 5, Pages 614-628.
- Fekete, S., Diederichs, M. (2013): Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels

in blocky rockmasses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 57, Pages 11-23.

原子力発電環境整備機構（NUMO）ホームページ,

http://www.numo.or.jp/q_and_a/faq/faq100008.html, 引用日平成 29 年 5 月 1 日

原子力発電環境整備機構（NUMO）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－, NUMO-TR-04-01, 原子力発電環境整備機構.

原子力発電環境整備機構（NUMO）（2009）：放射性廃棄物の地層処分事業について～公募のご案内～, 原子力発電環境整備機構.

原子力発電環境整備機構（NUMO）（2011）：“地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－”, NUMO-TR-11-01, 原子力発電環境整備機構.

原子力環境整備促進・資金管理センター（2017）：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2017 年版）, 経済産業省資源エネルギー庁.

Gigli, G., Casagli, N. (2011): Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 48, Issue 2, Pages 187-198.

早川裕弐, 小口 高 (2016)：地形学における地上レーザ測定の活用. 地学雑誌, 125, 299-324.

廣田彰久, 西山 哲, 水口尚司, 石村勝伸 (2016)：トンネル維持管理のためのひびわれ幅の画像計測手法の研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 72, No. 3, p. I_87-I_95.

石濱茂崇, 青木宏一, 片山政弘, 手塚仁 (2011)：切羽における不連続面の 3 次元計測システムの開発と現場適用事例, 応用地質, Vol. 56, No. 6, p. 316-324.

三戸嘉之, 本多政彦, 小野尚哉, 藤井徹, 安原裕貴, 浅野広樹, 石井靖雄 (2002)：のり面・崖地の高密度 3 次元座標データの取得と応用地質分野への活用 2 点間の高精度計測から, 面的な高密度計測へ, 応用地質, Vol. 42, No. 6,

P 351-354.

- Lai, P., Samson, C., Bose, P. (2014): Visual enhancement of 3D images of rock faces for fracture mapping, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 72, Pages 325-335.
- Lato, M., Hutchinson, J., Diederichs, M., Ball, D., Harrap, R. (2009a): Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp.935-946.
- Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., Harrap, R. (2009b): Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, pp.194-199.
- Lato, M. J., Vöge, M. (2012): Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 54, Pages 150-158.
- Mah, J., Samson, C., McKinnon, S. D. (2011): 3D laser imaging for joint orientation analysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, pp.932-941.
- 松川瞬, 板倉賢一, 早野明, 鈴木幸司 (投稿中): 岩盤における不連続面の自動推定に向けた3次元点群データの可変格子分割法.
- 水口尚司, 大西有三, 西山哲, 西川啓一, 下澤正道, 石村勝伸 (2017): 道路トンネルにおける画像及びレーザデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol. 71, No. 1 p. 20-30.
- 塩崎正人, 千葉史隆, 三上博 (2015): トンネル維持管理のための車載撮影装置の開発, 三井住友建設技術研究開発報告, No.13, p.10.
- Sturzenegger, M., Stead, D. (2009): Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts, Engineering Geology, 106, pp.163-182.
- 高木幹夫, 下田陽久 (編集) (2004): 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, P.7~32.

- 鶴田忠彦，笹尾 英嗣（2016）：瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削に伴って実施した壁面地質調査，応用地質，Vol. 56, No. 6, p. 298-307.
- 通商産業省（2000）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画を定めた件，平成 12 年 10 月 2 日，通商産業省告示第 592 号.
- Vöge, M., Lato, M. J., Diederichs, M. S. (2013): Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data, Engineering Geology, **164**, pp.155-162.
- Wang, G., Feng, Q., Roshoff, K. (2009): A new approach to tunnel digital geological mapping using 3D terrestrial laser scanning technique, In ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK, International Society for Rock Mechanics.
- 安田亨，山本秀樹，重田佳幸（2016）：走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R（ミーム・アール），日本ロボット学会誌，Vol. 34 , No. 9 , p. 589-590.

第 2 章 反射強度画像の画像解析による坑道壁面の岩相マッピング

2.1 背景

瑞浪研究所では、壁面観察を効率化するための手法整備を目的として、壁面観察と並行したレーザ計測が実施された。レーザ計測では、点群として高密度の三次元座標とともに、坑道壁面を構成する岩石の反射率や構成物質などの特徴を白黒の反射強度画像として取得することが可能である。既往研究では、対象物の高精度な三次元形状とレーザの反射強度を迅速に取得できるレーザ計測を活用することにより、地質スケッチを省力化できる可能性が示された（三戸ほか，2002）。そのため、リモートセンシングの分野で開発された画像解析手法を応用することで、坑道壁面に分布する岩種などを客観的かつ均一な精度で区分できる可能性がある。しかしながら、実際の坑道壁面や地表の露頭に対してレーザ計測を実施し、そのデータを用いて反射強度画像の画像解析を実施した事例は著者の知る限り存在しない。そのため、具体的な反射強度画像の画像解析の手順や坑道壁面に分布する岩石を対象としてマッピング可能な具体的な特徴が明らかになっておらず、壁面観察における代替手法としての適用性が示されていない。瑞浪研究所の壁面観察では、岩相や、断層、割れ目などの地質構造の分布と特徴を把握することを目的として、主に地質スケッチとそれに関連する記載事項を記した地質記載シートと観察した割れ目の種類、形状、走向傾斜などの属性情報が記載される割れ目記載シートにデータが作成される（鶴田・笹尾，2016）。これらのデータのうち、反射強度画像の画像解析では、地質記載シートに示される調査員が目視によるマッピングによって作成される地質スケッチに相当するデータを取得できる可能性がある。本章では、瑞浪研究所の立坑掘削時に実施された壁面観察とレーザ計測のデータを用いて、反射強度画像の画像解析によって、坑道壁面の地質の特徴をマッピングする方法を検討し、実際の地質に対する適用例を示す。

2.2 瑞浪研究所の立坑におけるレーザ計測の概要

瑞浪研究所では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の信頼性をさらに向上させるために、深地層の科学的研究の一環として、超深地層研究所計画を進

めている（JAEA, 2010）。本計画では、研究坑道の掘削工事が進められ、これまでに、深度 500m の 2 本の立坑（主立坑；掘削径 7.3m, 覆工後の内径 6.5m, 及び換気立坑；掘削径 5.3m, 覆工後の内径 4.5m）、深度 100m ごとに主立坑と換気立坑をつなぐ予備ステージ、並びに深度 300m と 500m に設置した主要な水平坑道（幅 4～5 m, 高さ 3～4.5m）が掘削された（図 2.2-1）。レーザ計測は、壁面観察と並行してレーザ計測が行われた範囲は、主立坑の深度 51.60m から 459.60m, 300m 予備ステージの主立坑中心から 4.35m から 31.20m, 300m 研究アクセス坑道の主立坑中心から 4.35m から 100.50m および 400m 予備ステージの主立坑中心から 4.35m から 30.75m の範囲において実施された（図 2.2-1）。

一般に、壁面観察において坑道壁面の可視画像（写真）を取得する際には、デジタルカメラが用いられる。しかしながら、坑道内という暗所において撮影された可視画像の品質は、ストロボ等の撮影用照明機材の性能や坑内の照明状況に左右される場合が多い。また、デジタルカメラでは、立坑のように 360° の坑壁全周を一回で撮影することはできず、撮影範囲を分割して撮影することになる。そのため、坑壁全周を展開させた可視画像を作成する場合には、分割撮影された画像を合成する必要がある。その際、各分割画像で明るさやコントラストの補正を行わなければならない。レーザ計測では、スキャナ本体のレーザ発信部が 360° 旋回するため、一回の計測で、坑壁全周を展開させた反射強度画像を取得することができる。さらに、レーザ計測では、近赤外線レーザによる計測のため照明機材の設置が不要で作業効率が良い。また、レーザ計測では、受光強度に加えて三次元座標の数値データも合わせて取得することができるなどの利点がある。坑道壁面における反射強度画像の濃度の違いから、反射強度の小さい泥岩は黒色に、反射強度の大きい砂岩は白色に表現されるという報告のとおり（三戸ほか, 2002）、レーザ光の反射強度は、対象となる岩石表面の反射率や構成物質（鉱物など）の違いを反映していると考えられる。

レーザ計測の概念を図 2.2-2 に示す。瑞浪研究所の立坑は、ショートステップ工法により掘削されており、立坑掘削サイクルのうち、1 回の壁面観察（高さ約 2.6m ごと）の観察時間は 3 時間程度（今津ほか, 2004）である。その観察時間内にレーザ計測に加えて可視画像撮影、地質マッピング、岩石・地下水試料

採取等が実施されている。調査後の坑道壁面は直ちに設計上厚さ 40cm の覆工コンクリートで覆われることから、調査時に漏れなく観察データを取得しておく必要がある。したがって、レーザ計測の適用にあたり、他の調査時間とのバランスを考慮し、設置・撤去時間を除いた実計測時間を約 20 分以内に収めるとともに、岩相区分のために高精度のデータを取得する必要があった。そのため、現場試験等により複数社の 3D レーザースキャナー機種の評価が行われ、立坑内の作業環境において比較的短時間に高精度のデータを取得できる計測機とし、リーグル社製の LMS-Z360i が選定された（鶴田ほか，2005）。LMS-Z360i の仕様を表 2.2-1 に示す。瑞浪研究所の主立坑では、観察区間の高さ約 2.6m、掘削径 7.3m の立坑壁面に対して、スキャナ本体が 360° 旋回して三次元座標および反射強度を取得する。取得点数は、水平方向に 6,000 点、鉛直方向に 1,500 点の計 9,000,000 点である。分解能は 3.8mm である。LMS-Z360i では、レーザ製品の安全基準クラス 1 程度の強さに対する反射強度が取得される。そして、レーザ計測の結果として出力される反射強度は、256 階調で正規化された相対値である。レーザ計測によって取得される三次元座標は、東西南北座標系に変換するため、坑壁全周を 12 分割する位置に、位置基準となる反射ターゲットが設置された。

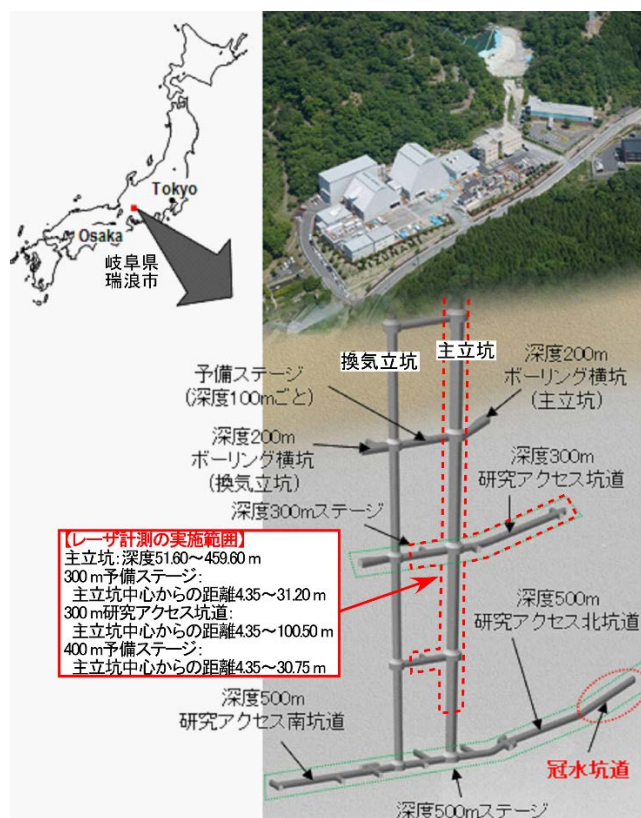


図 2.2-1 瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウトとレーザー計測の実施範囲

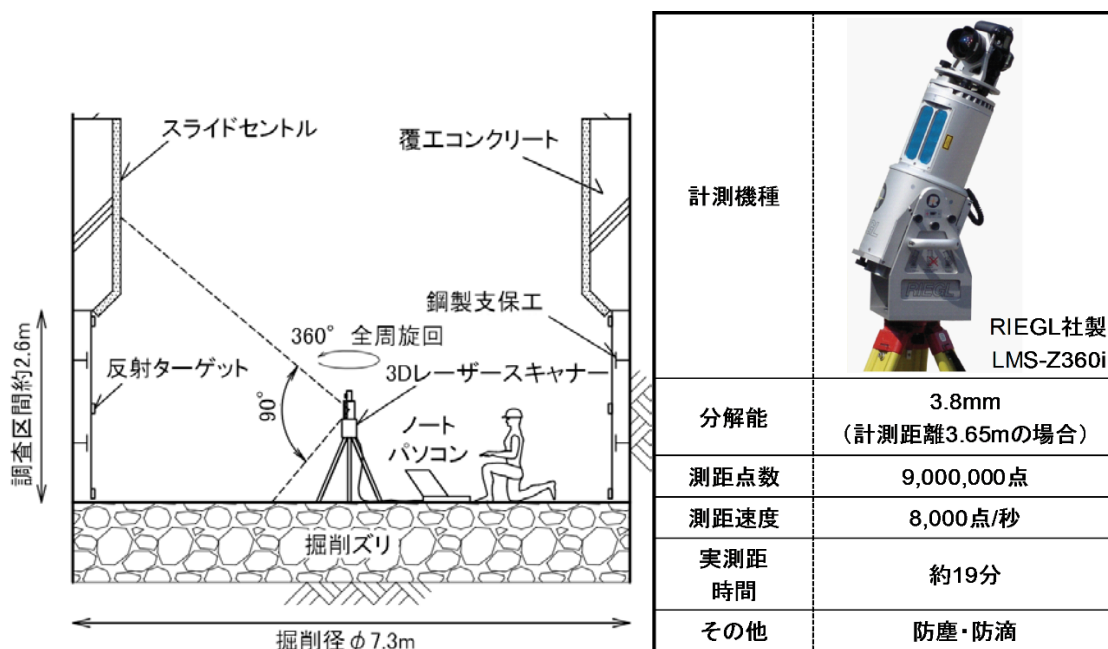


図 2.2-2 主立坑におけるレーザー計測概要とスキャナ本体の主な仕様
(持田ほか (2007) に基づく)

表 2.2-1 リーグル社製の LMS-Z360i の仕様（メーカー公表値に基づく）

| Technical Data 3D Scanner Hardware <i>RIEGL</i> LMS-Z360i | | |
|---|---|--|
| Rangefinder Performance¹⁾ | | |
| Eye safety class according to IEC60825-1:2001 | Laser Class 1 | |
| Measurement range ²⁾ | | |
| for natural targets, $\rho \geq 80\%$ | up to 200 m | |
| for natural targets, $\rho \geq 10\%$ | up to 60 m | |
| Minimum range | 1 m | |
| Measurement accuracy ³⁾ | typ. ± 6 mm (averaged), typ. ± 12 mm (single shot) | |
| Measurement resolution | 5 mm | |
| Measurement rate | up to 12 000 pts/sec @ low scanning rate (oscillating mirror) up to 8 000 pts/sec @ high scanning rate (rotating mirror) | |
| Laser wavelength | near infrared | |
| Laser beam focus range ⁴⁾ | adjustable in steps between 2 m and infinity | |
| <hr/> | | |
| Scanner Performance | | |
| Vertical (line) scan | | |
| Scanning range | 0° to 90° | |
| Scanning mechanism | rotating / oscillating mirror | |
| Scanning rate ⁵⁾ | 1 scan/sec to 20 scans/sec @ 90° scanning range | |
| Minimum angle stepwidth | 0.01° | |
| Angular resolution | 0.002° | |
| Horizontal (frame) scan | | |
| Scanning range | 0° to 360° | |
| Scanning mechanism | rotating optical head | |
| Scanning rate ^{5) 6)} | 0.01 °/sec to 15 °/sec | |
| Minimum angle stepwidth | 0.01° | |
| Angular resolution | 0.0025° | |
| Inclination Sensors | optional (specifications to be found in separate datasheet) | |
| Internal Sync Timer | | |
| for external GPS/INS synchronization | optional (specifications to be found in separate datasheet) | |
| <hr/> | | |
| General Technical Data | | |
| Interface: | for configuration & data output | Ethernet TCP/IP, 10/100 MBit/sec |
| | for configuration | RS 232, 19.2 kBd |
| | for data output | ECP standard (enhanced capability port) parallel |
| Power supply input voltage | 12 - 28 V DC | |
| Power consumption | typ. 78 W | max 96 W |
| Current consumption @ 12 V DC | typ. 6.5 A | max 8 A |
| @ 24 V DC | typ. 3.25 A | max 4 A |
| Main dimensions | 491 mm x 210 mm (Length x Diameter) | |
| Weight | approx. 13 kg | |
| Temperature range | -10°C to +50°C (operation), -20°C to +60°C (storage) | |
| Protection class | IP64, dust and splash-water proof | |

- 1) First, Last, or Alternating target mode selectable from scan line to scan line.
- 2) Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter and near to normal incidence of the laser beam. In bright sunlight, the operational range is considerably shorter than under an overcast sky.
- 3) Standard deviation, plus distance depending error $\leq \pm 20$ ppm.
- 4) Beam focus adjustable via software.
- 5) Scanning rates selectable via Ethernet Interface or RS 232.
- 6) Horizontal scan can be disabled, providing 2D-scanner operation.

2.3 瑞浪研究所の主立坑周辺の地質概要

瑞浪研究所周辺に分布する地質は、後期白亜紀の土岐花崗岩（石原・鈴木，1969）とそれを不整合に被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群（糸魚川，1980）から構成される。図 2.3-1 に、瑞浪研究所の主立坑および換気立坑に分布する瑞浪層群の地質層序を示す。主立坑において土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面は、深度約 166m において確認されている。瑞浪層群は、下位より、大～巨礫岩/粗粒砂岩主体の互層/泥岩主体の互層からなる土岐夾炭累層，細～大礫岩主体の互層，凝灰質砂岩主体の互層からなる本郷累層，および主に泥岩～泥質砂岩，軽石質粗粒砂岩，細～粗粒砂岩からなる明世累層に区分される。

図 2.3-2 に主立坑と交差する NNW 走向の断層の概要を示す。主立坑には、NNW 走向でほぼ鉛直傾斜の断層破碎帯が雁行状に分布する（中俣ほか，2007）。主立坑の深度 166m 以深の花崗岩部分では、断層は数条の断層岩からなるとともに強い変質を伴い、明瞭な割れ目帯は変質の影響により確認できない。また、断層には見かけの幅数十 cm～1m 程度の優黒色を呈する貫入岩が近接して分布しており、花崗岩と塩基性の貫入岩の境界は特に変質が著しく、石英以外のほとんどの鉱物が粘土鉱物に置換された粘土変質部が多い（中俣ほか，2007）。

以上の主立坑周辺の地質の特徴を踏まえ、本研究の反射強度画像の画像解析の適用については、花崗岩部分では、断層が交差し花崗岩や貫入岩の変質程度の違いが明瞭な深度 189.6m から 192.0m の立坑壁面を対象とする。また、堆積岩部分では、岩相変化に富む泥岩と砂岩からなる岩相が層厚数 cm から数十 cm（最大数 m）で頻繁に繰り返す土岐夾炭累層上部の砂泥互層が分布する深度 108.5 から 110.4m の立坑壁面を対象とする。

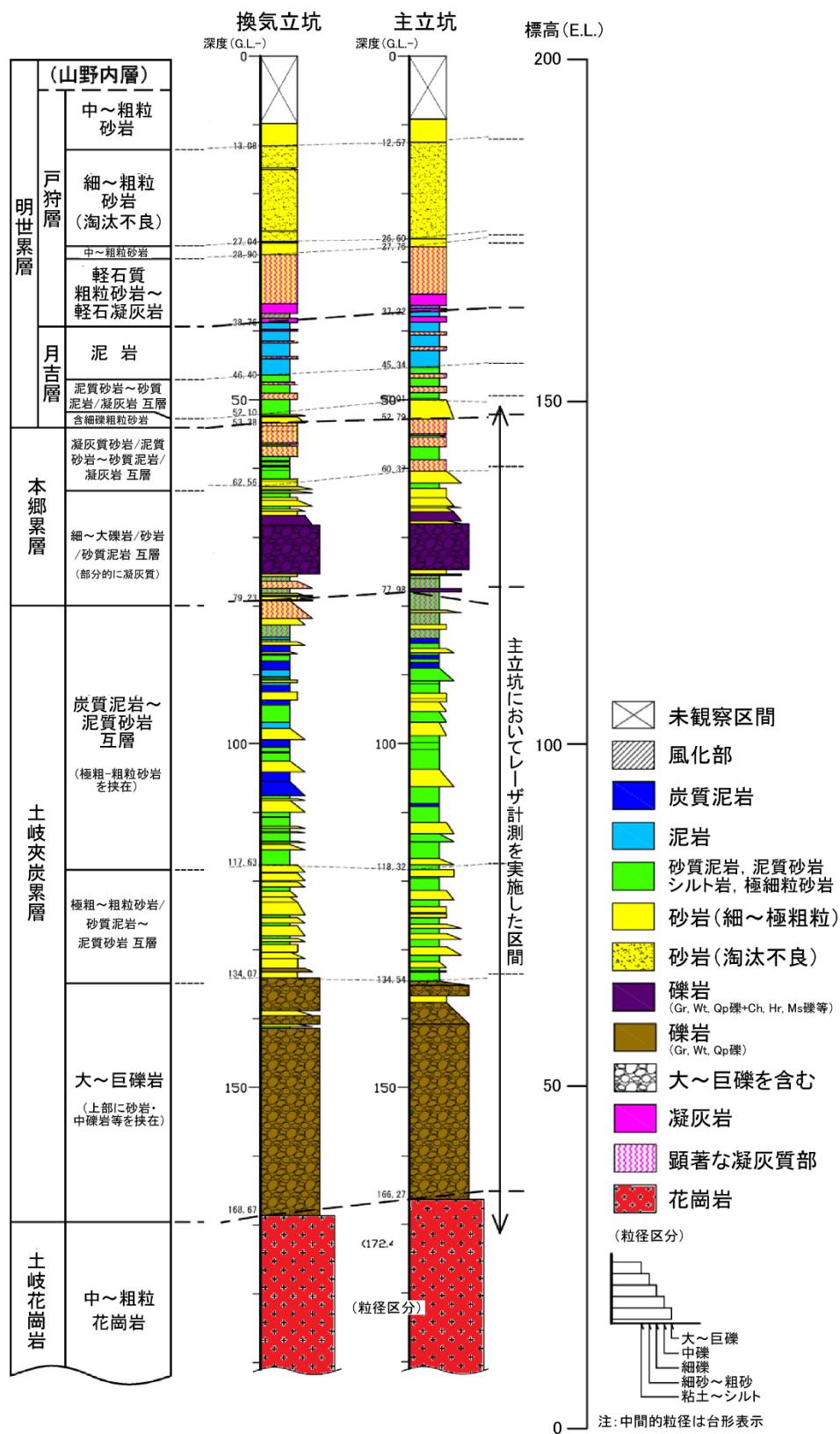


図 2.3-1 瑞浪研究所の主立坑および換気立坑に分布する地質層序概要 (持田ほか, 2007 に基づく)

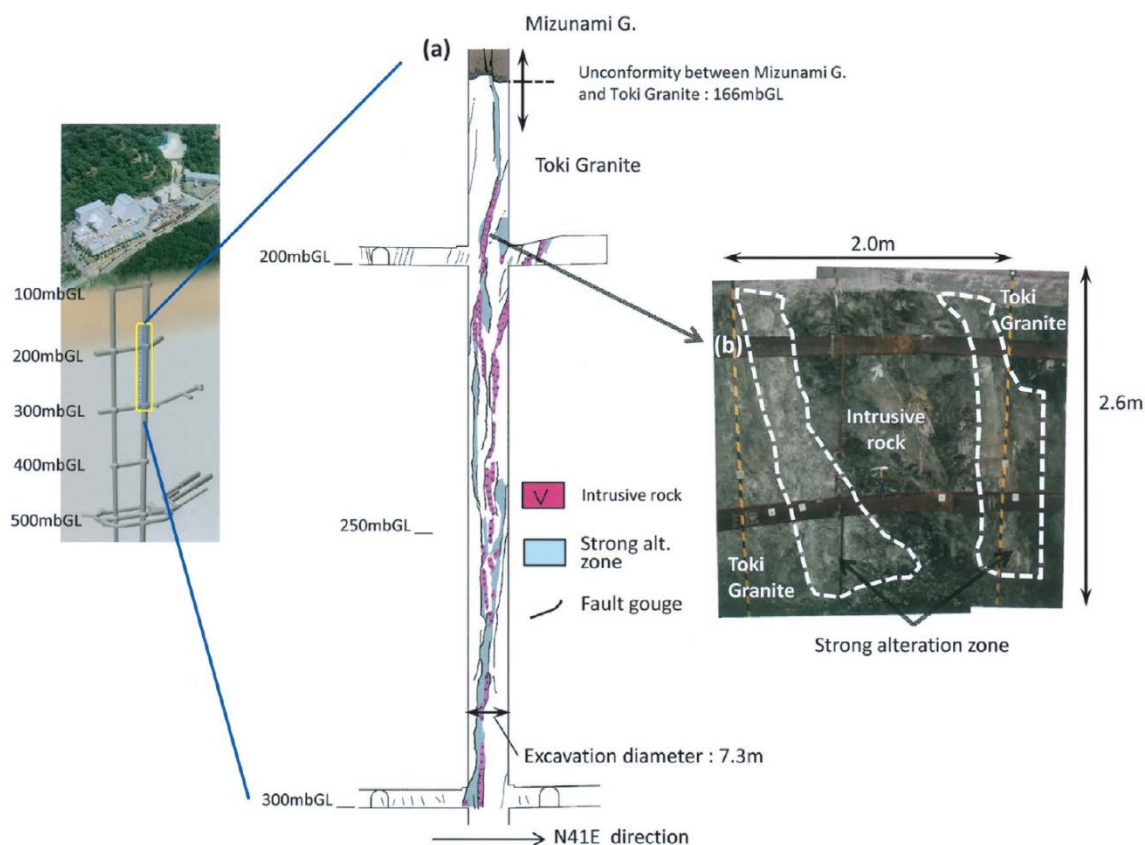


図 2.3-2 主立坑と交差する NNW 走向の断層の概要
(鶴田ほか, 2013 に基づき編集)

(a) 主立坑の深度 166m から 300m に沿った地質の特徴, (b) 強い変質を被った土岐花崗岩と貫入岩の写真

2.4 反射強度画像の画像処理による岩相マッピングの方法と結果

レーザ計測により取得される反射強度は、壁面を構成する物質の種類や表面粗さ、レーザの透過率などに応じて変化する。すなわち、反射強度は、岩石の種類や変質程度の違いを反映していると考えられるため、反射強度画像を用いた坑道壁面の岩相のマッピングを行うことができる。

花崗岩部分は変質程度の異なる花崗岩と貫入岩から構成され、また、堆積岩部分は数種類の岩石で構成される。このことから岩相マッピングでは、岩石を数種類に分類する必要がある。そこで、リモートセンシングの分野においてよく用いられる画像処理の手法を適用した。画像認識での分類の処理過程において濃淡や色などの特徴を識別する方法としては、大別して、認識対象が既知で分類すべき代表箇所がどのカテゴリに属するかを教えることにより分類する

「教師付き分類」と、認識対象の数が未知でどのようなカテゴリに属するか不明な場合に適用する「教師なし分類」がある（高木・下田，2004）。瑞浪研究所における壁面地質調査の場合，地質技術者の地質スケッチにより，分類すべき岩石の項目をあらかじめ設定できるため，本研究では「教師付き分類」を選択する。本研究の画像処理には，米国の Purdue 大学が主にリモートセンシング用に開発し，フリーソフトとして公開している MultiSpec(c)（Biel and Landgrebe, 2002）を使用した。

2.4.1 花崗岩を対象にした岩相マッピングの方法と結果

（1）花崗岩における適用範囲の選定

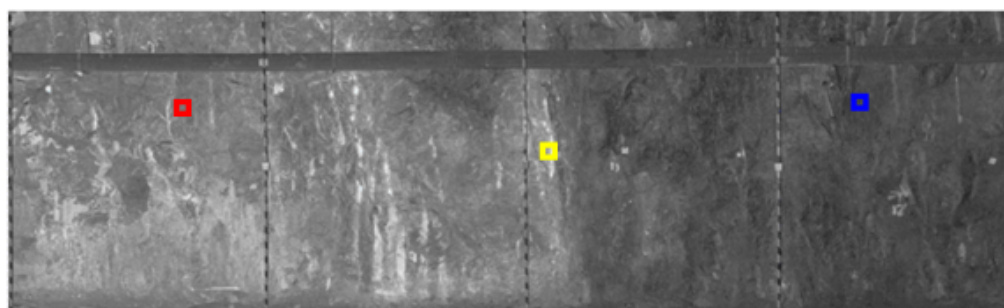
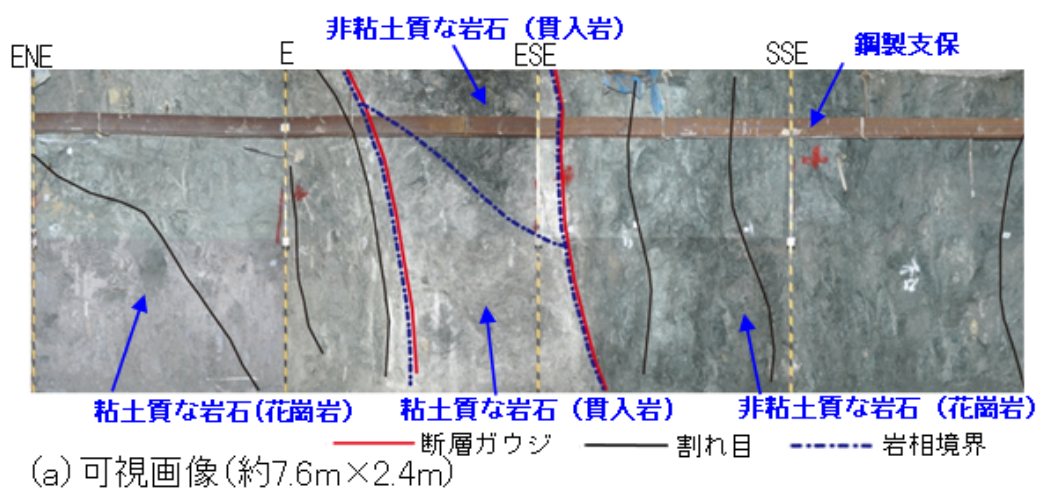
主立坑の花崗岩では，前述の通り，変質程度の異なる花崗岩と貫入岩が分布し，断層破碎帯に沿って著しい変質作用を被っている。断層破碎帯内部には，厚さ数 cm 程度の断層ガウジが数条分布する。断層ガウジに沿った箇所では，熱水変質の影響により花崗岩および貫入岩は部分的に粘土化作用を被っている（中俣ほか，2007）。適用対象区間については，変質程度の違いにより反射強度画像の濃淡が明瞭な深度 189.6m から 192.0m の全周とした。

（2）反射強度（濃度値）の頻度分布と岩相マッピング

MultiSpec(c)での画像処理では，「教師付き分類」である最尤法（Biel and Landgrebe, 2002）を選択する。最尤法は，分類すべきクラスがあらかじめ分かっている場合に適用する識別法であり，既知のクラスから抽出したトレーニングエリアを対象に特定のクラスに属する確率（尤度）を判定し，その尤度から推定される誤分類の確率が最小となる識別関数を作成しクラス分けを行う方法である。トレーニングエリアの指定にあたっては，画像上の岩石の色調を最も代表している領域を調査員の観察結果に基づき選択する必要がある。前述の通り，対象範囲の花崗岩においては，堆積岩との不整合面直下から強い変質作用が確認され，特に上位の堆積岩から連続する断層に沿って白色粘土化が著しい。また，断層ガウジに挟まれた幅 1.8 m 程度の範囲には，貫入岩が分布する（図 2.4.1-1a）。適用対象区間全周の岩石は，岩石の種類と変質程度の違いにより分類できる（図 2.4.1-2）。花崗岩は，黒雲母の緑泥石化や溶脱が生じている弱変質花崗岩（非粘土質），長石の白濁が生じて花崗岩の組織が不明瞭になって

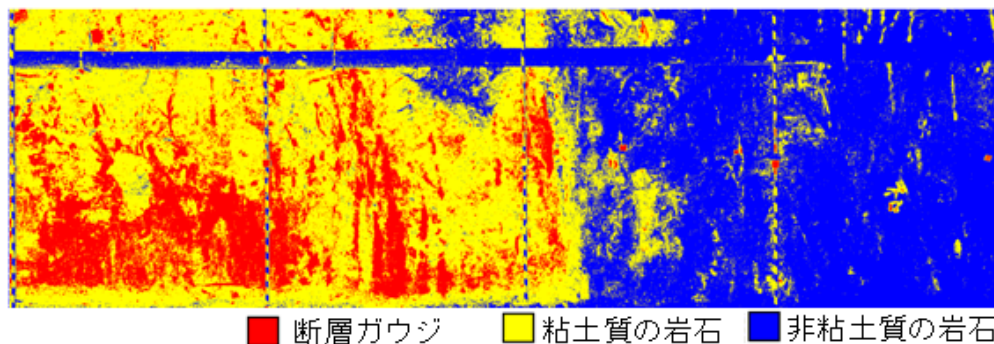
いる強変質花崗岩（非粘土質）、粘土化が著しくハンマーピックが突き刺さる程度の軟質の強変質花崗岩（粘土質）の 3 種類に分類される。貫入岩は、比較的変質の程度が弱い細粒緻密な貫入岩（非粘土質）、著しく粘土化を伴う貫入岩（粘土質）の 2 種類に分類される。そして、断層運動や熱水変質作用の影響により白色粘土化している断層ガウジを含めると全部で 6 種類に分類することができる。反射強度画像を用いた画像処理による岩盤区分を行なう前に、何が反射強度に関連しているかを把握する必要がある。そこで、反射強度画像の各岩盤領域の代表的な部分を 2,500 画素程度（50 ピクセル四方、実際の大きさを約 15cm 四方）切り出し、領域毎の濃度値の頻度分布を比較した（図 2.4.1-2）。その結果、変質程度の違いによって濃度値に有意な差が認められ、非粘土質の岩石の濃度値は 110 より低く、一方、粘土質の岩石の濃度値は 110 より高い。さらに断層ガウジのような粘土部分の濃度値は 180 以上である。一方、変質が同程度の花崗岩と貫入岩の濃度値の分布は、重複する領域が多く有意な差が認められないことから、画像処理による識別は困難であると考えられる。検討対象範囲内における反射強度は、主に変質による色調の違いに関連していると推察される。よって、変質程度の違いに着目し、非粘土質の岩石、粘土質の岩石、断層ガウジの 3 箇所のトレーニングエリアを設定し、岩相マッピングを行った（図 2.4.1-1a, b）。

岩相マッピングの結果については、花崗岩、貫入岩および断層ガウジが分布し、反射強度画像の濃淡が明瞭な ENE-S 区間について示す（図 2.4.1-1 c）。画像処理による岩相マッピングの結果は、地質スケッチの結果と概ね整合的であり、非粘土質の岩石（図 2.4.1-1c の青色部分）が卓越する領域と粘土質の岩石（図 2.4.1-1c の黄色部分）が卓越する領域の境界は、可視画像にトレースした岩相境界と整合的である。さらに、断層ガウジ周辺と同程度の粘土化が生じ軟質化している ENE-E 区間の下半部は、主に断層ガウジ（図 2.4.1-1c の赤色部分）に分類された。以上の結果から、適用対象区間における花崗岩では、変質程度の違いに基づく岩相マッピングを行うことができた。



■ ■ ■ トレーニングエリア

(b) 反射強度画像



(c) 反射強度画像の最尤法による岩石マッピング

図 2.4.1-1 土岐花崗岩 (深度 189.6m~192.0m) における岩相マッピング
(早野ほか, 2007)

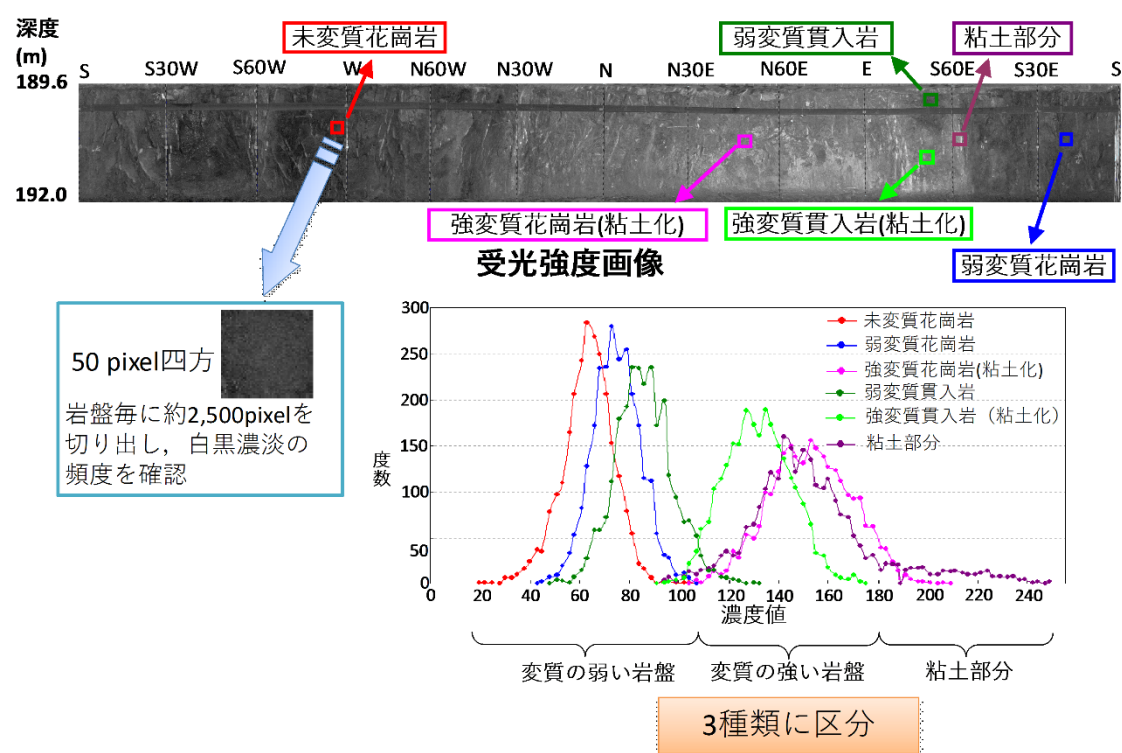


図 2.4.1-2 各岩相の代表的な箇所からの切り出しと濃度値頻度分布（花崗岩）
（早野ほか，2007）

2.4.2 堆積岩を対象とした岩相マッピングの方法と結果

（1）堆積岩における適用範囲の選定

レーザ計測により取得できる反射強度画像は、256 階調の白黒濃淡画像である。そのため、画像処理による岩相マッピングの適用性の評価に適切な対象としては、濃淡の明瞭な複数の岩石が分布する区間を選択することが望ましい。このことから、堆積岩の適用対象は、瑞浪層群のうち泥岩と砂岩からなる岩相が層厚数 cm～数十 cm（最大数 m）で頻繁に繰り返す土岐夾炭累層上部の砂泥互層とした。この地層のうち、反射強度画像の濃淡差が比較的明瞭な砂質泥岩、粗粒砂岩、炭質泥岩および泥質砂岩が分布する深度 108.5～110.4m の S-W 区間の反射強度画像（約 5.7m×1.9m の範囲）を対象とした（図 2.4.2-1a, b）。

（2）反射強度（濃度値）の頻度分布と岩相マッピングの結果

地質スケッチの結果に基づき、対象区間の中から粗粒砂岩、泥質砂岩、砂質泥岩および炭質泥岩の 4 箇所のトレーニングエリアを設定し、各岩石の濃度値の頻度分布を比較した（図 2.4.2-2）。その結果、粗粒砂岩と泥質砂岩、また、

砂質泥岩と炭質泥岩の頻度分布の重複が多い。しかしながら、ピーク値は岩石毎に異なっており、濃度値の高い方（白色側）から粗粒砂岩、泥質砂岩、砂質泥岩、炭質泥岩の順に分布している。このトレーニングエリアのデータを用いて、最尤法による岩相マッピングを行った（図 2.4.2-1c）。その結果、岩相マッピングの結果における水平方向に連続性の良い砂岩主体の岩石と泥岩主体の岩石が接する境界面の分布が、地質スケッチ上の岩相境界面と比較的よく整合している。

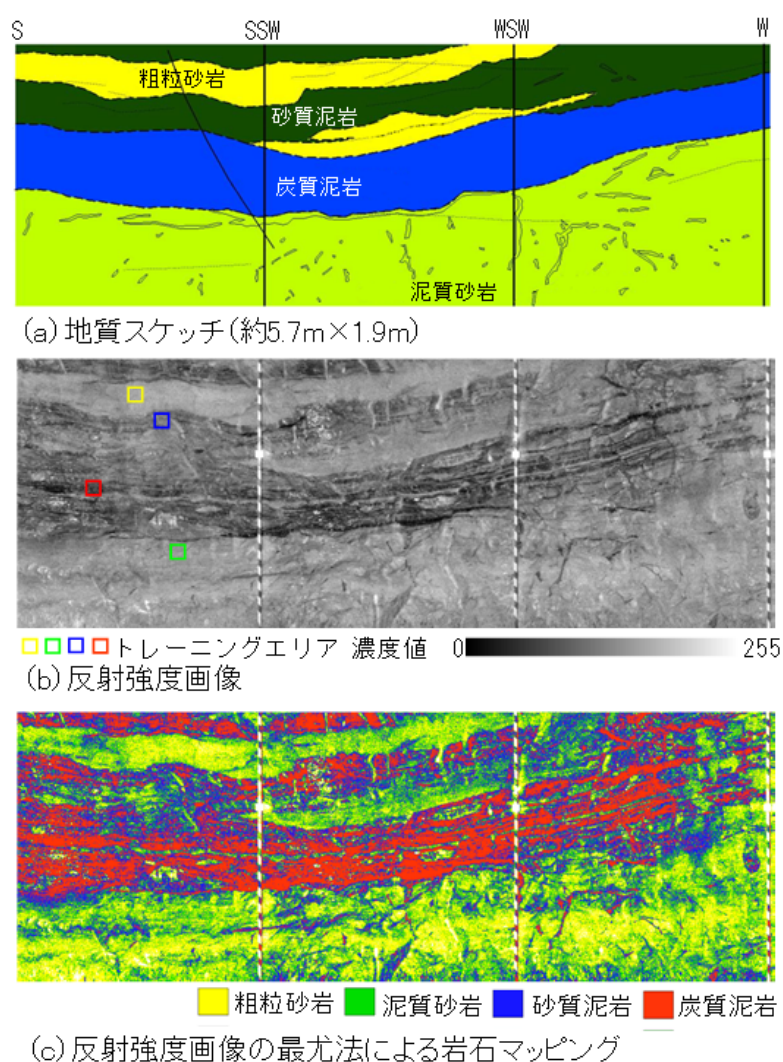


図 2.4.2-1 瑞浪層群（深度 108.5m～110.4m）における岩相マッピング
（持田ほか，2007）

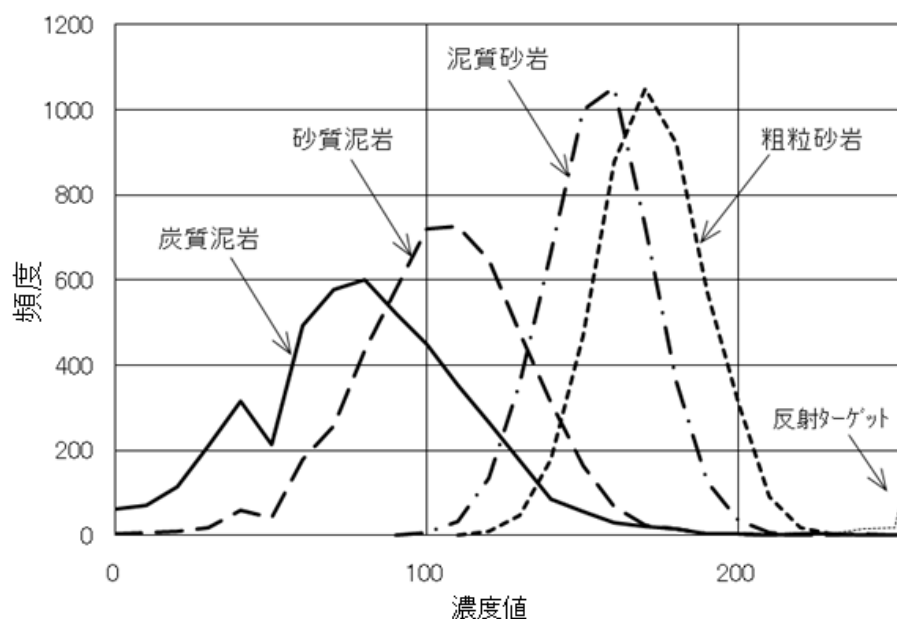


図 2.4.2-2 濃度値頻度分布（堆積岩）（持田ほか，2007）

2.5 まとめ

本章では，研究所の主立坑に分布する堆積岩および花崗岩を対象にして，レーザ計測によって取得される反射強度画像を用いた画像処理による岩相マッピングの事例を紹介した。この手法を適用することにより，分類処理のためのトレーニングエリアを選定するために地質技術者が代表的箇所のみ観察すれば，未観察箇所についても自動的に地質スケッチを補間するデータを取得することができる。また，これまでのレーザ計測を適用した地質調査手法の整備では，岩相マッピングのほかに，三次元座標データを用いた断層や割れ目などの地質構造の走向・傾斜を算出する手法を整備している（中俣ほか，2007）。壁面地質調査の作業時間は3時間程度であり，地質スケッチと地質構造の走向・傾斜の測定にその大半が費やされる。そのため，30分程度で作業を完了することが可能なレーザ計測を適用することにより，地質技術者の作業を効率化し，さらに，地質技術者の能力の差から生じる取得データのばらつきを低減し，取得データの品質の均一化を図ることが期待できる。

第 2 章の参考文献

- Biel, L. and Landgrebe, D.(2002) : MultiSpec-a tool for multispectral-hyperspectral image data analysis, Computers & Geosciences, Vol28, pp.1153-1159.
- 早野明・鶴田忠彦・天野健治 (2007) : 3D レーザースキャナーを用いた坑壁地質観察の効率化ー, 日本応用地質学会, 平成 19 年度研究発表会講演論文集, pp.211-212.
- 今津雅紀・佐藤稔紀・坂巻昌工 (2004) : 地下 1,000m の立坑工事に着手瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事, トンネルと地下, 土木工学社, Vol. 35, No. 6, pp. 31-42.
- 石原舜三・鈴木淑夫 (1969) : 東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類, 地質調査所報告, No. 1, pp. 113-127.
- 糸魚川淳二 (1980) : 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, No. 1, pp. 1-50.
- 三戸嘉之・本多政彦・小野尚哉・藤井 徹・安原裕貴・浅野広樹・石井靖雄 (2002) : のり面・崖地の高密度三次元座標データの取得と応用地質分野への活用, 応用地質, Vol.42, No.6, pp.351-364.
- 持田裕之・天野健治・鶴田忠彦 (2007) : 3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試みー瑞浪超深地層に分布する瑞浪層群での適用事例ー, 応用地質, Vol.48, No.3, pp.126-131.
- 中俣公德・鶴田忠彦・天野健治・西本昌司・吉田英一 (2007) 遮水性構造として機能する断層の内部構造と変形・変質作用-瑞浪超深地層研究所に分布する土岐花崗岩での研究事例-, 日本応用地質学会, 平成 19 年度研究発表会講演論文集, pp.207-208.
- 日本原子力研究開発機構 (JAEA) (2010) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review2010-016.
- 高木幹雄・下田陽久監修 (2004) : 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.1551-1601.
- 鶴田忠彦・天野健治・持田裕之・秋好賢治・松田重雄・兵頭浩 (2005) : 3D レーザースキャナーを用いた地質・地質構造の把握と施工情報への活用, 日本応用地質学会平成 17 年度研究発表会・講演論文集, pp. 263-266.

鶴田忠彦，笹尾 英嗣（2016）：瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削に伴って実施した壁面地質調査，応用地質，Vol. 56，No. 6，p. 298-307.

鶴田忠彦，田上雅彦，天野健治，松岡稔幸，栗原新，山田泰広，小池克明（2013）：瑞浪超深地層研究所における深部地質環境のモデル化を目指した地質学的調査，地質学雑誌，第 119 巻，第 2 号，pp.59-74.

第 3 章 レーザ計測データの坑道壁面の割れ目観察への適用性

3.1 背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分や石油・天然ガスの備蓄などの大規模な地下施設建設プロジェクトにおける坑道掘削では、通常、掘削直後のトンネルの側壁や切羽を対象とした壁面地質調査が行われる。その壁面地質調査で取得される地質データはプロジェクトにおいて重要であり、一般的な山岳トンネルの掘削工事のように地山評価や支保判定のために用いられるだけでなく、プロジェクトの目的に応じて水理解析や力学解析などのベースとなる地質構造モデルの構築に用いられる。掘削対象の岩盤が亀裂性岩盤として分類される場合、壁面地質調査では割れ目の分布と性状に着目した観察が行われる（以下、「割れ目観察」）。割れ目観察では、坑道壁面における割れ目の分布位置とトレース長が調査員の目視観察によるマッピングや写真撮影によって記録され、さらに、割れ目方位がクリノメーター（傾斜計と水準器が組み込まれた方位磁石）を使用して簡易的に測定されるといったように、従来からの手法（以下、「従来手法」）が今日においても一般的である。総延長 200 km 以上の坑道掘削が想定される高レベル放射性廃棄物の処分場建設（NUMO, 2004）のような大規模な地下施設建設プロジェクトでは、長期間、昼夜にわたって坑道掘削が行われ、それに伴い膨大な回数の割れ目観察が実施されると考えられる。もし、割れ目観察が従来手法に基づくならば、以下の課題が生じることが懸念される。

- 坑道掘削工事に伴い実施される割れ目観察には制限時間があり、建設コスト削減の観点から観察時間が短縮される場合、制限時間内に施設設計や解析評価の要求品質を満たすデータを取得できない。
- 割れ目観察毎に調査員が異なる場合、データの品質は調査員の経験や能力などに依存するため、データの品質にバラつきが生じる。
- 岩盤崩落や落石による労働災害の防止の観点から調査員の露岩部分への立入が制限される場合、岩盤に接近した目視観察やクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位の測定ができないため、データ取得精度が低下する。

これらの課題解決には、観察時間の短縮、データ品質の平準化およびデータ取得精度の維持の三つを実現できる手法を用意する必要がある、物体表面の3次元形状を瞬時にかつ高解像度で取得できる3次元レーザスキャナ計測（以下、「レーザ計測」）が有効であると考えられる。これまでに、いくつかの既往研究によってレーザ計測を適用した割れ目観察手法の検討が行われた。例えば、道路や鉄道沿いの岩盤が露出する斜面を対象とした計測（Lato *et al.*, 2009a; Lato *et al.*, 2009b; Sturzenegger and Stead, 2009; Lai *et al.*, 2014; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Assali *et al.*, 2014; Mah *et al.*, 2011）やトンネルにおける側壁や切羽を対象とした計測（Fekete *et al.*, 2010; Fekete and Diederichs, 2013; Wang *et al.*, 2009）が行われ、岩盤表面の3次元形状から層理面や割れ目面といった不連続構造を抽出し、その分布位置や方位を取得できることが示された（Lato *et al.*, 2009a; Lato *et al.*, 2009b; Sturzenegger and Stead, 2009; Lai *et al.*, 2014; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Assali *et al.*, 2014; Mah *et al.*, 2011; Fekete *et al.*, 2010; Fekete and Diederichs, 2013; Wang *et al.*, 2009）。また、数 m から十数 m 規模の露頭や坑道を対象として、割れ目方位の測定に関する正確性やデータ取得に関する最適な条件の検証（Lato *et al.*, 2009b; Sturzenegger and Stead, 2009; Lai *et al.*, 2014）、あるいは割れ目抽出のためのアルゴリズムの検討（Gigli and Casagli, 2011）が行われた。しかしながら、十数 m 以上の長さの坑道を対象として、レーザ計測データに基づく割れ目データと従来手法に基づく割れ目データを十分に比較した事例は、著者の知る限り存在しない。そのため、レーザ計測データから従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか良く分かっていない。

JAEA は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究のうち深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市にある瑞浪研究所において調査坑道の掘削を伴う研究開発を行っている。亀裂性岩盤である結晶質岩を主な研究対象とし、調査坑道の掘削時における調査のひとつとして割れ目観察が実施された（鶴田・笹尾, 2016）。そして、割れ目観察を含む壁面地質調査の手法整備の一環として、一部の坑道では、割れ目観察と並行してレーザ計測が行われた。本研究では、レーザ計測の割れ目観察への適用性、すなわち、レーザ計測データか

ら従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認することを目的とする。そのため、レーザ計測データから割れ目の分布位置、トレース長および方位を取得する方法を検討し、その方法を瑞浪研究所の長さ 50 m 程度の水平坑道に適用して割れ目データを取得し、その結果を従来手法に基づく割れ目データと比較する。

なお、瑞浪研究所の坑道掘削時に行う割れ目観察は、地下水や物質の選択的な移動経路として機能すると推定される断層や割れ目の分布や特徴を把握することを目的としている（鶴田・笹尾，2016）。よって、本研究における割れ目とは、掘削前から存在する天然割れ目を指しており、掘削時の発破によって生じた岩盤の亀裂や破断面は対象外である。

3.2 瑞浪研究所の地質概要と本研究の対象範囲

瑞浪研究所には、白亜紀後期～古第三紀の土岐花崗岩体と、それを不整合に覆う新第三紀中新世の瑞浪層群が分布する。瑞浪研究所の坑道掘削地点では、深度約 170 m 以深（標高約 30 m）に土岐花崗岩が分布し、不整合を介して瑞浪層群が上位に分布する（石橋ほか，2014）。土岐花崗岩体は、岩体の中心部ほど珪長質な正累帯深成岩体であるとされており（湯口ほか，2013）、岩体のほぼ中心に位置する瑞浪研究所に分布する岩石は黒雲母花崗岩（以下「花崗岩」）である（石橋ほか，2014）。図 3.2-1 に、本研究の対象となる坑道の位置と、その坑道の壁面における割れ目と岩盤等級の分布を示す。瑞浪研究所の坑道は、深度 500 m の主立坑および換気立坑の 2 本の立坑と、それらをつなぐ水平坑道群から構成される（JAEA, 2016）。本研究は、亀裂性岩盤である土岐花崗岩体に対して掘削された可能な限り長い水平坑道を対象とするため、主立坑中心からの掘削距離程が 100.5 m である深度 300 m 研究アクセス坑道から検討範囲を選定する（図 3.2-1）。水平坑道における 1 回の掘削サイクル毎の掘削長は、岩盤分類評価に基づく地山判定結果に応じて異なり 1.0 から 1.7 m であり、深度 300 m 研究アクセス坑道では、71 回の掘削サイクルによって掘削された。割れ目観察も掘削サイクル毎に行われ、それぞれの観察区間には主立坑側から順に管理番号が振られている（図 3.3-1）。主立坑沿いには、強い変質を伴う北北西走向の断層がほぼ鉛直に分布する。その断層には見かけの幅が数十 cm～1 m 程

度の優黒色を呈する貫入岩が近接して分布しており，花崗岩との接触部分では特に変質が著しく，石英以外のほとんどの鉱物が粘土鉱物に置換された粘土変質部が多い（鶴田ほか，2013）。深度 300 m 研究アクセス坑道の主立坑から掘削距離程 40 m までの範囲の岩盤では，主立坑沿いの断層から派生した断層の分布に伴い著しく割れ目が発達し，さらに変質作用を被っており，地盤工学会の岩盤分類評価（岩盤分類基準化委員会（編），2004）に基づく判定は D 級ないし CL 級である（図 3.3-1）（川本ほか，2012）。そのような岩盤では，壁面形状が複雑であり，レーザ計測データが表す坑道壁面形状だけから割れ目面の部分とそれ以外の部分を判別することは困難である。一方で，断層近傍の割れ目は，地質構造モデルにおいて一定の幅をもった断層帯あるいは破碎帯といった一つの構造としてまとめられるため，必ずしもその中の個々の割れ目の属性情報を必要としない。本研究では，断層などの要因で極端に割れ目が発達するような区間は対象外とする。そのため，深度 300 m 研究アクセス坑道の掘削距離程 45.1 から 100.5 m までの長さ 55.4 m の区間（観察区間 31 から 71）を本研究の対象範囲とする（図 3.3-1）。この範囲の岩盤等級は，ほとんどが B 級であり（図 3.3-1），割れ目間隔は平均して 60 cm 以上で岩盤の変質の程度は弱い（川本ほか，2012）。

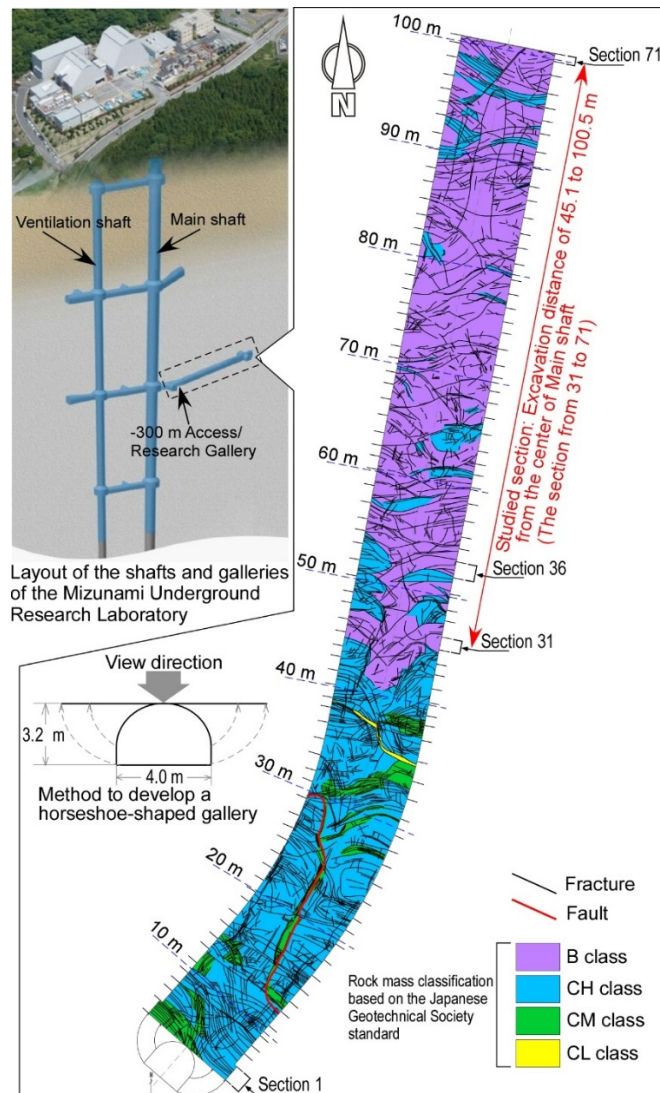


図 3.2-1 瑞浪超深地層研究所の立坑と水平坑道のレイアウトと深度 300m 研究アクセス坑道における割れ目
岩盤等級，研究対象範囲の分布図，分布図は川本ほか，2012 に基づく。

3.3 レーザ計測の概要と点群の前処理

レーザ計測は，発破によって砕かれた岩石を取り除いた直後に，割れ目観察と併行して実施された。レーザ計測に用いた機種は，RIEGL 社製の LMS-Z360i である（持田ほか，2007）。図 3.3-1 に，水平坑道におけるレーザ計測の模式図を示す。坑道壁面は，側壁と切羽の部分に分けられる。スキャナ本体は，レーザ光が坑道側壁に照射される姿勢で坑道中心に設置され，坑道の側壁を中心に計測された。レーザ計測の取得データは，坑道壁面の 3 次元形状を表す点群である。図 3.3-2 に，点群の処理の流れと各過程における点群の構成を示す。

生データの点群の各点は、レーザスキャナの位置を原点とするローカル座標系である球面座標系 (θ , ϕ , r) と直交座標系 (x , y , z), レーザ光の反射強度 (I), デジタルカメラで撮影される可視画像と点群のマッチングによって与えられる色情報 (R_p , G_p , B_p) から構成される (図 3.3-2a)。生データ以降の構成と処理については後述する。側壁には、点群の座標系をローカル座標系から東西南北座標系に変換する際の基準となる反射ターゲットが設置される。レーザ光を照射するスキャンは、左側壁から開始される。坑道の掘進方向 (図 3.3-1 の θ 方向) と平行に坑道の奥から手前に向けてスキャンを行う毎に、スキャナ本体のレーザ光の発信部は、天盤を經由し右側壁の方向 (図 3.3-1 の ϕ 方向) に 0.06° 刻みで回転する。スキャン範囲は、 θ 方向が 90° , ϕ 方向 240.06° である。レーザ計測の所要時間は、スキャナの設置と撤去を含めて 20 分程度である。スキャナ本体から側壁までの最短距離は約 2.2m であり (図 3.3-1), θ 方向のスキャン範囲から計算されるスキャン可能な掘削長は 4.5m 程度である。しかし、レーザ光の発信部から側壁までの距離 (r) は、スキャン範囲の中心部より端部の方が長いため、その結果、スキャン範囲の端部では中心部より点群の点間隔が大きくなる。このことを考慮すると、実際にスキャン可能な掘削長は、最大でも 3m 程度である。深度 300 m 研究アクセス坑道における掘削サイクル毎の掘削長は 1.0 から 1.7 m であることから、1 回で側壁全体を計測でき、計測範囲には、坑道側壁だけでなく、切羽および前区間の支保や吹付コンクリートの一部も含まれる。 θ 方向および ϕ 方向のスキャン解像度は両方とも 0.06° であり、取得される点数は、 θ 方向が 1,500 点、 ϕ 方向が 4,001 点の計 6,001,500 点である。生データのスキャン解像度に対する点群の点間隔は r によって異なり、すべての点の r の平均から算出される点間隔は 2.7 mm 程度である。しかしながら、生データとしての点群にはノイズが含まれるため、後述する点群のリサンプリング (平滑化) と判読画像の生成によって、最終的な点間隔は 11 mm 程度になる。

レーザ計測直後の生データの点群の前処理には、RIEGL 社の地上型 3D レーザスキャナ用ソフトウェア RiScan PRO を用いた。はじめに、ローカル座標系である直交座標系 (x , y , z) (図 3.3-2a) が東西南北座標系 (X , Y , Z) (図 3.3-2b) に変換される。東西南北座標系への変換により割れ目方位の算出が可能になる。

東西南北座標系には，国土地理院が定める平面直角座標系Ⅶ系を採用した。

RiScan PRO では，左側壁および右側壁に設置された反射ターゲット（図 3.3-1）に東西南北座標系の座標値を割り当てると変換マトリクスが計算され，それを用いて座標変換が行われる。つぎに，生データの点群に含まれるノイズの処理と後述する判読画像の生成の際にパソコンへの負荷を軽減するために，点群のリサンプリングと不要部分の削除を行う。具体的には，スキャン解像度が， θ 方向および ϕ 方向ともに 0.06° から 0.12° になるように，すなわち，それぞれの方向の点群の点数が 2 分の 1 になるようにリサンプリングを行う。この場合，点群全体としては 4 分の 1 になる。点群の不要部分の削除に関しては，吹付コンクリートなどの範囲の点群を削除した他，点群の構成要素のうち，後述の判読画像の生成において必要としないレーザ光の反射強度 (I) および色情報 (R_p , G_p , B_p) を削除する（図 3.3-2a, b）。以上の処理を行うと，1 区間あたりの点群の点数は，約 600 万点から約 60 万点になる。

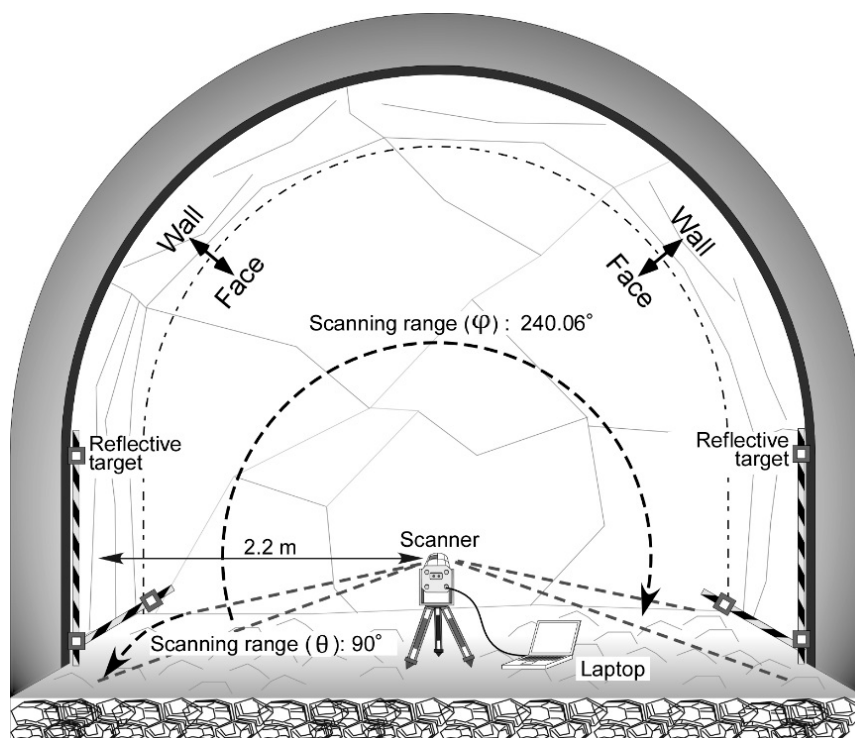


図 3.3-1 水平坑道におけるレーザ計測の模式図

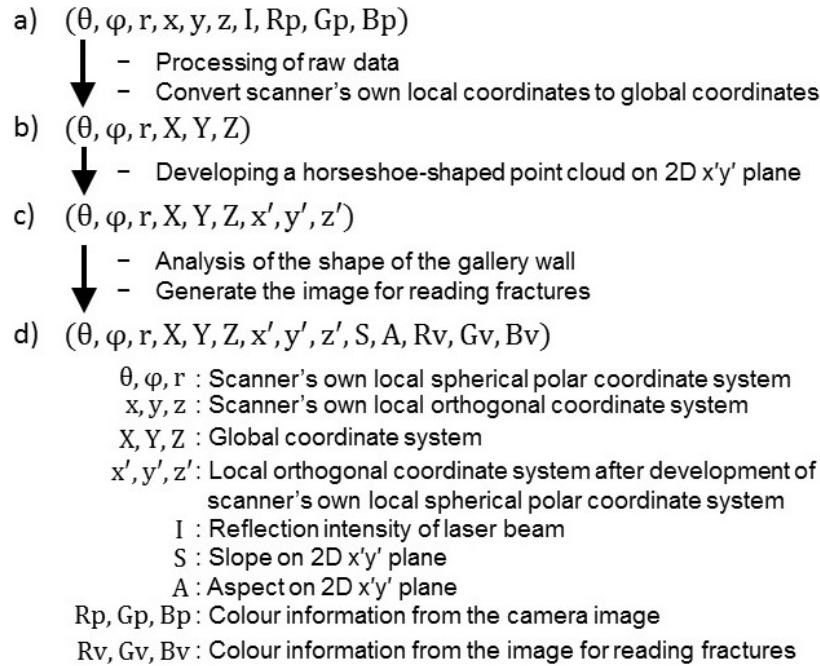


図 3.3-2 点群の構成と点群の処理

3.4 割れ目観察の概要と点群に基づき取得する割れ目の属性情報

割れ目観察は、坑道掘削の掘削サイクルの中で、発破によって砕かれた岩石を取り除いた直後に実施される。観察終了後、原則として鋼製支保、ロックボルトおよび吹付コンクリートによる支保に露出した岩盤は覆われるため、この観察が坑道壁面から割れ目データを取得できる唯一の機会である(鶴田・笹尾, 2016)。掘削サイクル毎に割り当てられる観察時間は、地上から坑道への資機材の搬入出を含めて約 1 時間である(鶴田・笹尾, 2016)。坑道掘削作業は、昼夜にわたって実施されるため、調査員は適宜交代される(鶴田・笹尾, 2016)。観察作業時における天盤や側壁からの落石による労働災害を防ぐため、調査員は岩盤の露出する範囲に立ち入ることが原則禁止されており、岩盤に接近した割れ目の観察や方位の計測を行うことができない(鶴田・笹尾, 2016)。

割れ目観察では、トンネルの側壁と上半アーチの境界線であるスプリングラインがスキャンラインとして設定され、それと交差する 1 m 以上のトレース長を有する割れ目が基本的な記載対象である(鶴田・笹尾, 2016)。瑞浪研究所周辺における空中写真判読によるリニアメントと露頭の割れ目密度の検討の結果、長さが概ね 1 m 以上の割れ目がフラクタル特性を有すること(Sasaki and

Ota, 2004) が、1 m 以上の割れ目に限定された主な理由である。また、瑞浪研究所周辺の土岐花崗岩体の上部には、低角度傾斜（水平面に対して概ね 30° 以下の傾斜）の割れ目が発達する（Sasao *et al.*, 2015; 石橋ほか, 2012）。そのため、スキャンラインと交差しにくい低角度の割れ目であっても、2 m を超えるトレース長を有する割れ目は記載対象である（鶴田・笹尾, 2016）。さらに、複数の割れ目の交差部は、透水性構造として機能する可能性があること（森田・渡辺, 2003; 竹内ほか, 2013）を踏まえ、分岐、断続、雁行などの特徴を有する割れ目は、その長さに関わらず記載対象である（鶴田・笹尾, 2016）。記載対象の割れ目の分布位置とトレース長は、調査員が目視観察によって作成するトレースマップとして記録されるとともに、割れ目の方位、種類、開口幅、充填物の特徴、母岩の変質状況、湧水状況などを定量・定性的な割れ目の属性情報は割れ目記載シートに記録される（鶴田・笹尾, 2016; 川本ほか, 2012）。割れ目方位の計測において鋼製支保などの帯磁性資材がクリノメーターに影響することが懸念される場合、その代替手段として分度器などにより坑道の掘進方向に対する角度が記録され、その結果が割れ目方位に換算される（鶴田・笹尾, 2016）。これらの割れ目の属性情報のうち、点群に基づき取得できる情報は、壁面形状から読み取れる情報に限られる。図 3.4-1 に、坑道壁面の形状の一例を示す。坑道壁面において割れ目が無いインタクトな部分には、弱面となる部分が無く、発破の際に強い引張破壊が生じるため、壁面は粗く凹凸のある形状になる傾向がある（図 3.4-1a）。また、発破の影響によりひび割れが生じる場合、その割れ目は粗い割れ目面になるだけでなく、天然割れ目と比較して連続性に乏しい。一方、坑道壁面に割れ目が分布する場合、割れ目が弱面となるため、強い引張破壊が生じることはなく、割れ目面に沿って岩盤が剥がれ落ちる。露出した割れ目面は平滑であり、また、割れ目に沿って連続するエッジ形状を形成する傾向がある（図 3.4-1b）。厳密には、天然割れ目とそれ以外の掘削影響による破断面やひび割れを識別するためには、形状だけでなく割れ目面の形態や充填物の特徴などの情報も踏まえる必要があるが、それぞれの形状の特徴は明確に異なるため、識別は容易である。よって、点群に基づき取得する割れ目の属性情報は、壁面形状から平滑な面を割れ目として読み取ることにより取得できる割れ目の分布位置およびトレース長である。それに加えて、抽

出される割れ目の方位を点群の東西南北座標系の座標値から算出できる。しかし、割れ目の種類、充填鉱物の特徴、母岩の変質状況、湧水状況などの定性的な属性情報は、壁面形状と関係がないため点群から取得することはできない。また、本研究が対象とした点群の解像度では、より詳細なスケールの形状認識を伴う割れ目面の凹凸といった形態や割れ目の開口幅を取得することはできない。

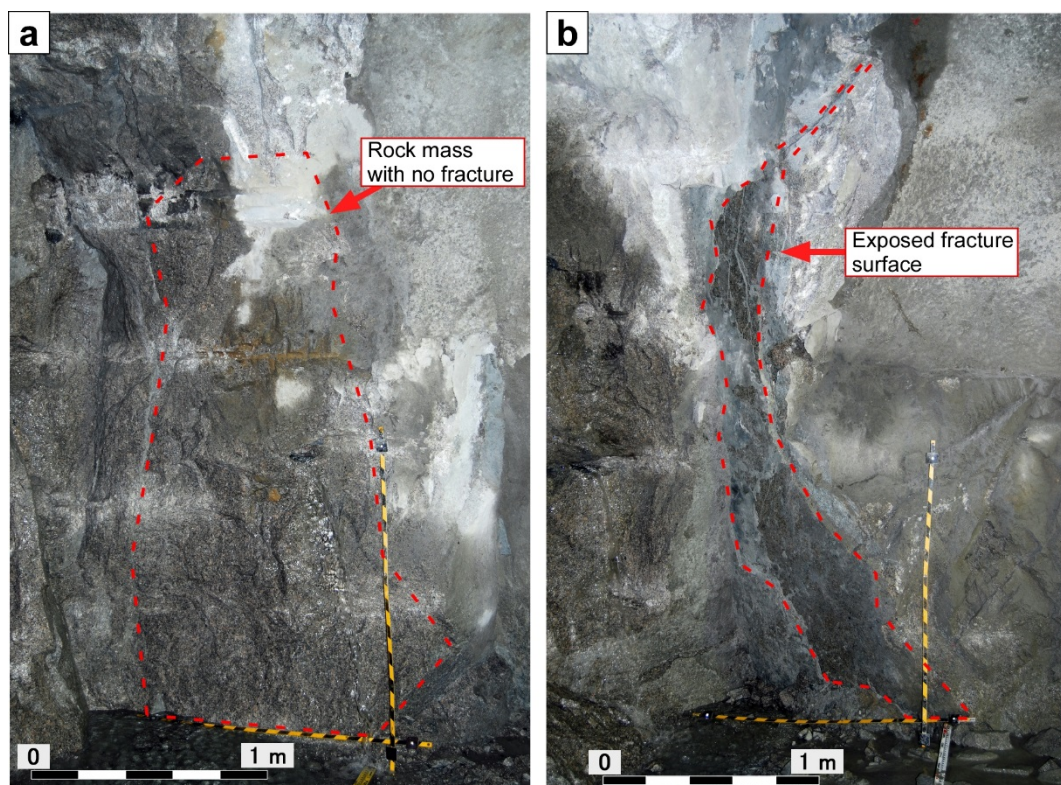


図 3.4-1 坑道壁面の表面形状
(a)割れ目のないインタクトな岩盤部分、(b) 割れ目面の露出した岩盤部分

3.5 点群に基づく割れ目データの取得方法

図 3.5-1 に、坑道内におけるレーザ計測の実施から点群に基づいて割れ目を抽出し、その属性情報を取得するまでの手順を示す。坑道内におけるレーザ計測を実施した後は、室内作業として生データの点群の前処理を行う。その内容は、3.3 節において述べた。ここでは、点群に基づき割れ目を抽出する方法と、その後の抽出した割れ目の属性情報としてトレース長と方位を取得する方法に

ついて、観察区間 36 の結果を示しながら説明する。

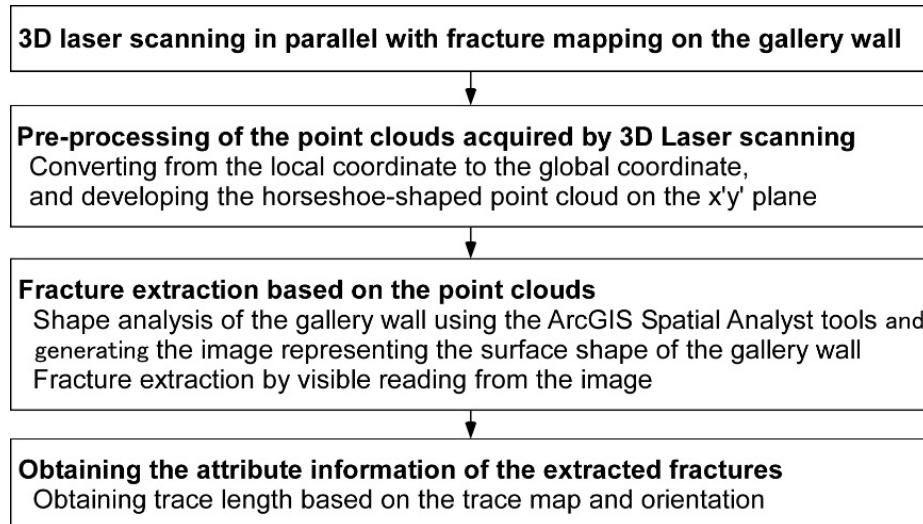


図 3.5-1 レーザ計測の実施から割れ目データ取得までの手順

3.5.1 坑道壁面に分布する割れ目の抽出方法

(1) 方法の検討

既往研究による割れ目の抽出方法は、割れ目を自動的に抽出するためのアルゴリズムを使用する方法と、点群から構築された 3 次元モデルから目視によって割れ目を抽出する方法に大別される。前者の方法には、点群から構築したメッシュモデルの各メッシュの法線ベクトルを分類することにより割れ目を抽出する方法 (Lato *et al.*, 2009b) や、格子状に配列した一定サイズの立方体ブロックで点群を分割し、各ブロックに含まれる点に対して最小 2 乗法により面をフィッティングさせ、それらの面の位置と方向に基づく分類によって割れ目面を抽出する DiAna アルゴリズム (Gigli and Casagli, 2011) などがある。前者の方法は、自動的に割れ目を抽出できるため、客観的なデータ取得の観点では優位であるが、既往研究 (Gigli and Casagli, 2011) の事例では、数メートルスケールの露頭への適用に限られている。一定の長さを有する馬蹄形の坑道かつ発破掘削により形成された複雑な壁面形状に対して適用できる汎用的なアルゴリズムは存在しない。そのため、十数 m 以上の長さの坑道に対しては、後者の方法が採用されている (Fekete *et al.*, 2010)。本研究においても同様であり、前者を採用する場合、割れ目が形成する平滑面と強い引張破壊によって形成さ

れた凹凸のある破断面を最も効率的に判別するための閾値を検討した上で、既往研究のアルゴリズムの最適化あるいは新たなアルゴリズムの構築を行う必要がある。本研究では、点群が表す坑道壁面形状から従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認することに主眼を置いているため、後者の方法を採用する。既往研究では、3次元モデルをパソコンのモニタに表示させ、それを回転させながら割れ目だと判断できる平滑面やエッジ形状が割れ目として抽出されているが（Fekete *et al.*, 2010）、馬蹄形の坑道が対象の場合、一つの視野方向から、すなわち、二次元平面上に坑道壁面全体を表示することができない。3次元モデルに示された割れ目の抽出結果は、割れ目観察の記録シートに表示する際に使い勝手が悪いだけでなく、割れ目の分布位置とトレース長を取得に用いるトレースマップを作成する際に、3次元の割れ目の抽出結果を二次元平面上に展開する必要がある。トレースマップの作成においては、点群が表す壁面形状を二次元に展開してから割れ目を抽出の方が容易である。そこで、本研究では3次元モデルの目視判読する方法ではなく、二次元平面上に計測範囲全体の壁面形状を表示した画像（以下、「判読画像」）から割れ目を目視判読によって抽出する方法を検討する。

(2) 判読画像の生成

判読画像の生成には、Esri社の地理情報システムソフトウェア ArcGIS の拡張機能である地形分析ツールを使用する。ArcGIS では、本来地形図などの地理情報が扱われるため、数値標高モデル（DEM）データのような X 軸を東西方向、Y 軸を南北方向、Z 軸を標高とした直交座標系のデータが ArcGIS に入力され、XY 平面上において Z 値を参照するマップが生成される。もし、ArcGIS の XY 平面上に馬蹄形の点群が置かれ、Z 値を参照するマップが生成される場合、坑道の側壁部分の点が重なるため、XY 平面のマップに坑道壁面全体を表示することができない。そのため、ArcGIS には馬蹄形の点群を二次元平面に展開した点群を入力する必要がある。図 3.5.1-1 に、点群の展開方法を示す。

図 3.5.1-1 の左側は馬蹄形の生データの点群を示しており、その座標系は、レーザスキャナ的位置 o を原点とするローカル座標系である球面座標系 (θ, ϕ, r) あるいは直交座標系 (x, y, z) （図 3.3-2a）である。図 3.5.1-1 の右側は二次元平面に展開された点群を示しており、その座標系は二次元平面上に展開後の

直交座標 (x' , y' , z') (図 3.3-2c) である。 x' , y' , z' は, θ , ϕ , r から計算される。具体的には, x' と y' は観察区間毎の r の平均値とそれぞれ θ と ϕ から算出される弧の長さとし, z' は観察区間毎の r の平均値と各点の r との差とする。また, 二次元平面に展開後, z' 方向のプラス側に坑道壁面の内側が向くようにするため, θ と ϕ から算出される弧の長さに-1 を乗じた。ArcGIS には, 二次元平面上に展開された後の x' , y' , z' が追加された点群 (図 3.3-2c) を入力する。図 3.5.1-2 に, ArcGIS の拡張機能である地形分析ツールを使用した壁面形状の分析と画像生成の手順を示す。はじめに, 入力した点群の x' , y' , z' に基づくラスタ空間分析が行われ, x' y' 平面上に格子状に並んだ一定サイズのセルが配置され, 各セルに含まれる点の z' の平均値を参照値とするラスタデータ (画像) が生成される。その際, 各セルに概ね 4 個の点が格納されるようにセルサイズを調整する。次に, 図 3.5.1-2 に示す 3×3 の格子がラスタデータの各セルを移動し, 3×3 の格子の中央に位置するセル e に対して, 隣接する 8 個のセル (a, b, c, d, f, g, h, i) の z' 値の平均値を加味するアルゴリズムにより傾斜と傾斜方位が計算される。その結果, 傾斜と傾斜方位を参照値とするラスタデータ (画像) が生成される。それぞれの画像の配色については, 傾斜に対しては白黒濃淡を与え, 傾斜方向に対しては色相環を与える。最後に, 傾斜画像に 65%透過する傾斜方位画像を重ね合わせることで判読画像が生成される。判読画像の各セルの色情報 (R_v , G_v , B_v), 傾斜および傾斜方位を各セルに含まれる点と対応づけた後, 点群を出力した (図 3.3-2d)。これにより, 判読画像の色情報と東西南北座標系 (X , Y , Z) が関係付けられるため, 目視判読により抽出した割れ目の方位が算出可能になる。

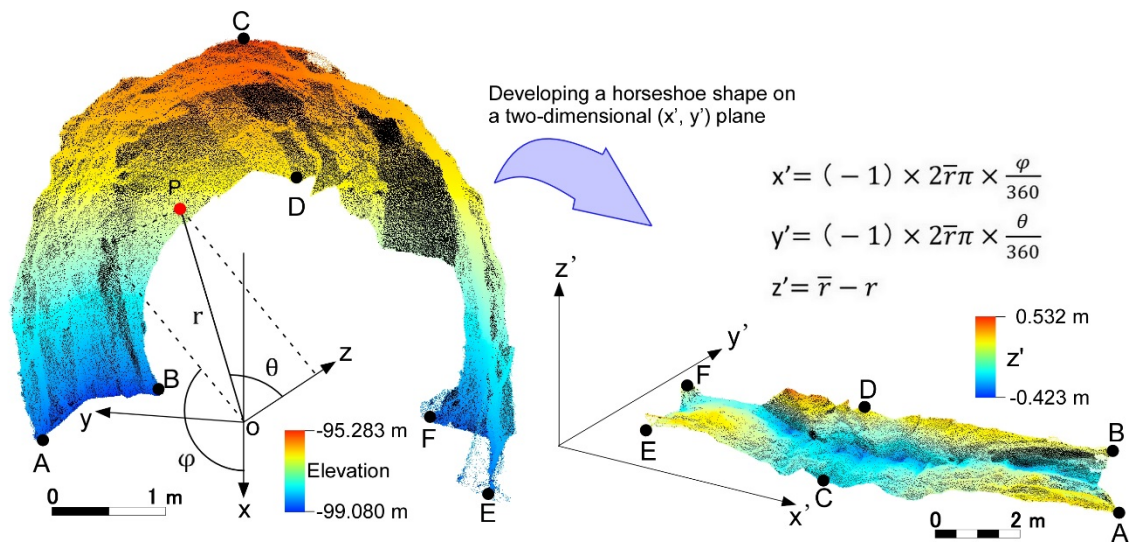


図 3.5.1-1 馬蹄形の点群の x' y' 平面への展開方法
座標 (θ, ϕ, r) は、スキャナー本体を原点とするローカルな球座標系である。座標 (x', y', z') は、座標 (θ, ϕ, r) を展開した後のローカルな直交座標系である。

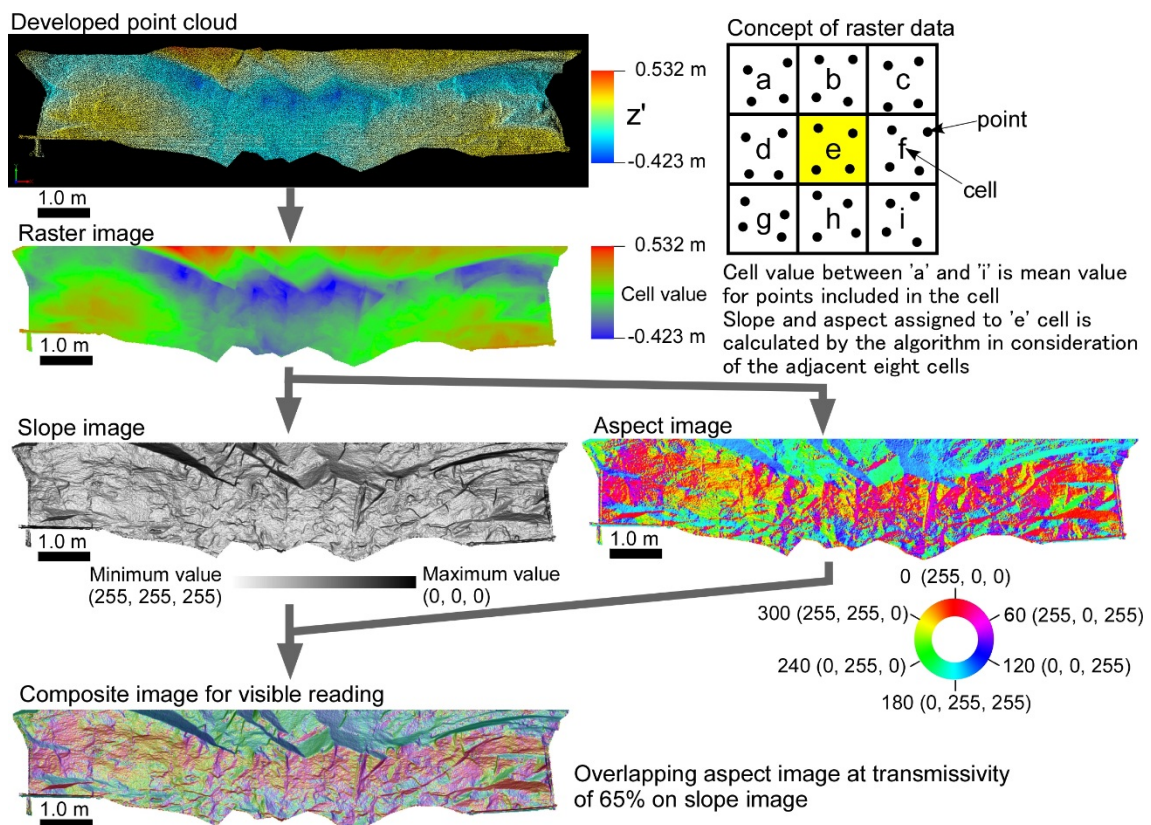
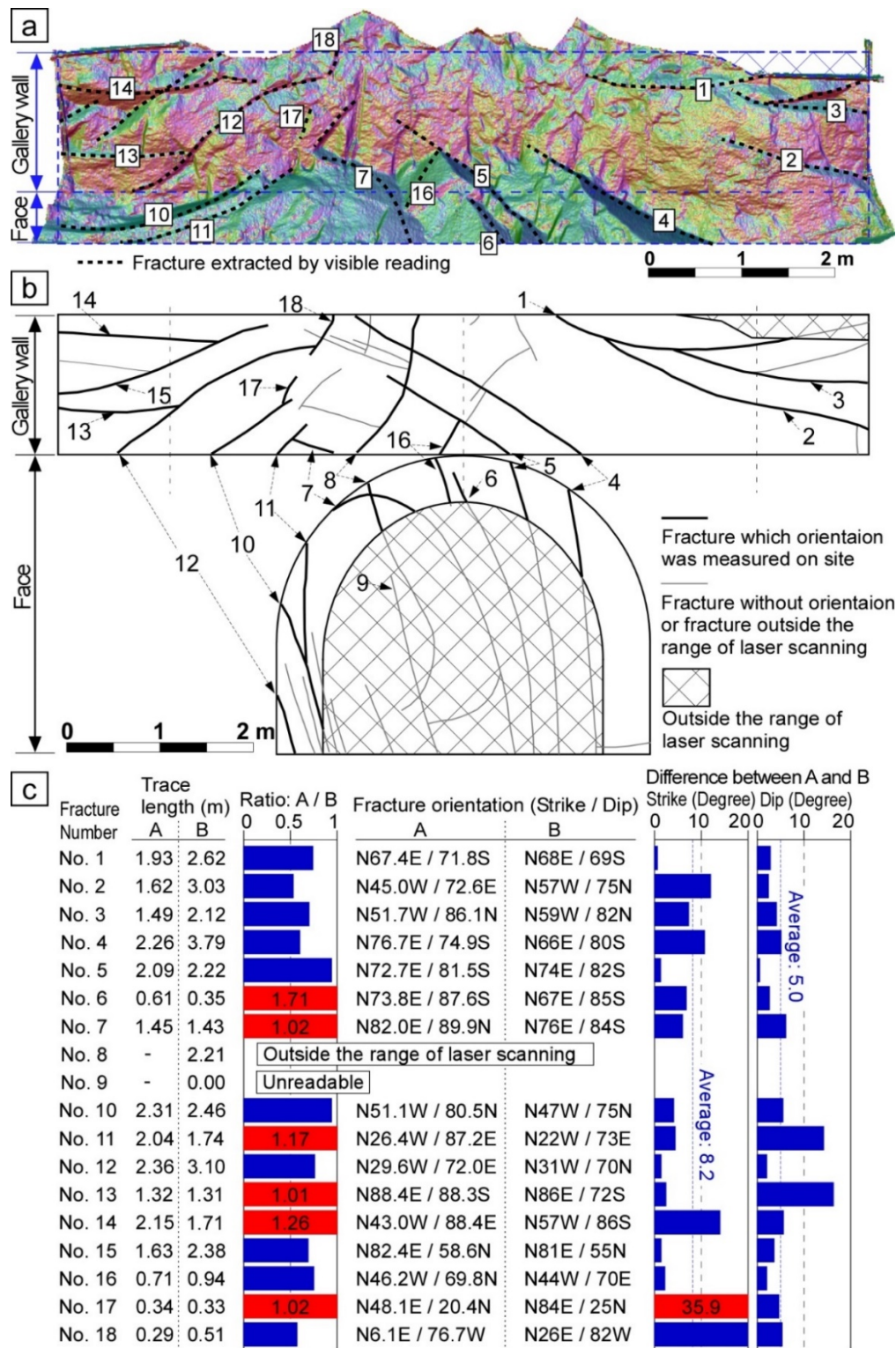


図 3.5.1-2 ArcGIS の地形分析ツールを用いた割れ目を抽出するための画像生成の手順

(3) 判読画像を用いた割れ目抽出方法

図 3.5.1-2 に示す傾斜画像および傾斜方位画像において、坑道壁面に露出する割れ目は平滑であるため、同一の平滑面にあるセルの値はほぼ同じである。割れ目方位は、傾斜と傾斜方位の組み合わせで一つのデータであるため、傾斜画像に傾斜方位画像を重ね合わせた判読画像においては、ほぼ同じ色が広がる領域が割れ目として識別できる。坑道壁面に割れ目面が広く露出する場合、判読画像ではほぼ同じ色が広がる領域になり、割れ目面が連続してエッジ形状を形成する場合、判読画像ではほぼ同じ色が線状に並ぶ。馬蹄形の坑道のアーチ部分は二次元平面に展開されることにより歪みが生じるが、アーチ部分に割れ目面が分布する場合であっても、判読画像では割れ目面は曲面として表現され、傾斜と傾斜方位は緩やかに変化するので、判読画像から曲面を割れ目として識別することは容易である。よって、判読画像において割れ目として識別する基準は、①ほぼ同じ色の広がる領域、あるいは②ほぼ同じ色が線状に配列する部分となる。割れ目観察では、1 m 以上のトレース長を有する割れ目が記載対象であるが、判読画像では必ずしも割れ目の端から端まで完全にトレースすることができないため、判読画像上 1 m より短い割れ目であっても抽出する。図 3.5.1-3 に、判読画像を用いた割れ目抽出の一例として、観察区間 36 の結果を示す。図 3.5.1-3a に、判読画像から割れ目を抽出し、その部分をトレースした結果を示す。図 3.5.1-3b に、調査員の目視観察に基づく割れ目観察結果を示す。データ整理の都合上、割れ目にはそれぞれ共通の番号を振っている。レーザ計測の範囲外の部分には網掛けをしている。図 3.5.1-3c に、判読画像からの抽出された割れ目の属性情報を従来手法に基づくデータと比較した結果を示す。観察区間 36 において、従来手法に基づく観察により 18 条の割れ目が抽出されたが、そのうち、レーザ計測の範囲内にある割れ目は 17 条である(図 3.5.1-3b,c)。それらの割れ目のうち、判読画像からは 16 条の割れ目を抽出することができた。トレース長および割れ目方位の比較については後述する。



A: Value based on point cloud data
B: Value based on geological observation by geologist

図 3.5.1-3 観察区間の割れ目マッピングの結果

(a)点群から生成された画像において目視判読された割れ目, (b)現場において調査員が目視により抽出した割れ目, (c) (a)と(b)によって抽出された割れ目属性情報の比較

3.5.2 抽出した割れ目の属性情報の取得方法

点群から取得できる割れ目の属性情報は、3.4 節で示したとおり、割れ目の分布位置、トレース長、割れ目方位である。割れ目の分布位置およびトレース長は、判読画像の目視判読に基づき作成されるトレースマップから取得する。

図 3.5.1-3a のトレースマップから計測されたトレース長を図 3.5.1-3c に示す。トレース長は、グラフィックソフトウェアにおいて作成されたトレースマップから、トレースラインの長さを読み取ることによって取得される。従来手法のトレースマップは、設計上の坑道の仕上がり形状の大きさで作成されているが、判読画像の大きさは、実際の掘削形状に基づいているため従来手法のトレースマップより大きい。従来手法のトレース長と比較するため、判読画像のスケールを従来手法のトレースマップのスケールに調整した後、トレース長を取得した。また、比較の範囲を同一にするため、図 3.5.1-3c に示した従来手法のトレース長には、レーザ計測の範囲外の部分を含めていない。トレース長の比較の結果は、判読画像から抽出した 16 条の割れ目のうち 6 条は完全にトレースを再現しており、それ以外の割れ目は、少なくとも 5 割以上のトレースを再現している（図 3.5.1-3c）。

点群から取得するもう一つの属性情報である割れ目方位の算出には、Topcon 社の ScanMaster を使用した。図 3.5.2-1 に、ScanMaster を用いた割れ目方位の計測例を示す。判読画像生成後に ArcGIS から出力する点群（図 3.3-2d）を ScanMaster に入力し、東西南北座標系（X, Y, Z）に基づき点群を 3 次元で表示する。判読画像から抽出した割れ目に対応する箇所を容易に選択するため、3 次元に表示した点群には、判読画像と同じ色を配色する。ScanMaster では、判読画像から抽出した割れ目に対応する点群を選択し（図 3.5.2-1 の紫色の点群）、選択された点群にフィットする面を生成することができ（図 3.5.2-1 の紫色の長方形）、さらに、その面を代表する 3 点（図 3.5.2-1 の黒い四角）の座標値を出力することができる。割れ目方位（走向と傾斜）は、出力した 3 点の座標値を用いて、3 点を通る面の方程式を解く方法（塩野ほか、1990）によって算出する。観察区間 36 において割れ目方位を比較した結果、No. 17 の割れ目は低角度の割れ目であるため走向の差が 35.9° と大きい、その差は平均して走向が 8.2° 、傾斜が 5° であり、概ね従来手法の結果と調和的である。

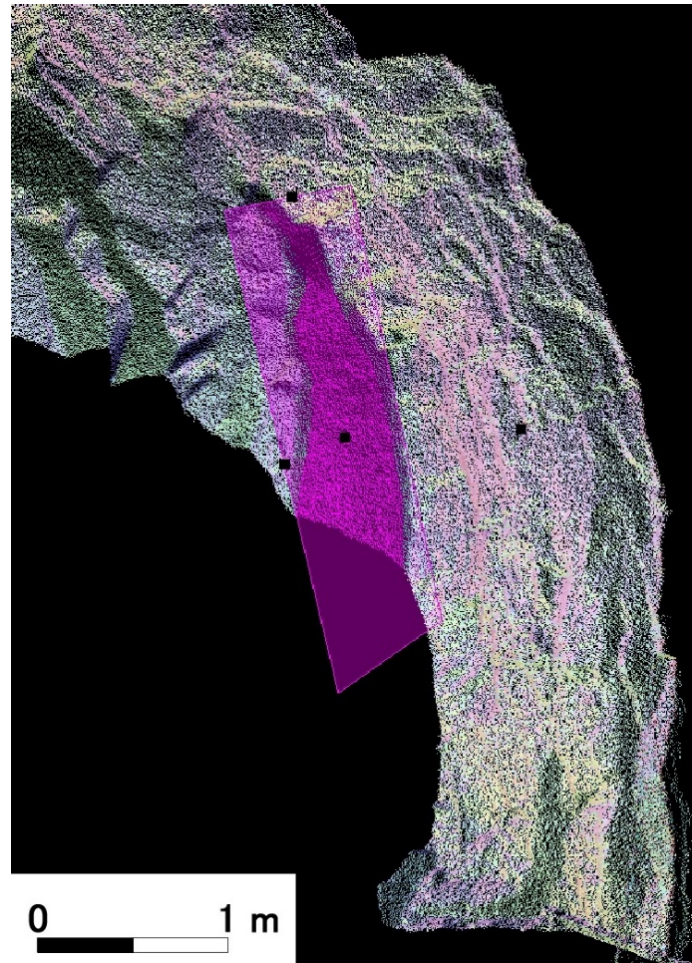


図 3.5.2-1 抽出された割れ目に対応する点群にフィットする面
抽出された割れ目の割れ目方位（走向と傾斜）はベストフィットした面から算出される。この割れ目は観察区間 36 の No.4 である。フィットした面上にある三つの黒い四角の座標値が割れ目方位の計算に使用される。

3.6 結果

点群が表す坑道壁面の形状から従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認するために、4.5 節において検討した方法を、深度 300 m 研究アクセス坑道の掘削距離程 45.1 から 100.5 m までの長さ 55.4 m の区間に適用し、割れ目データを取得した。図 3.6-1 に、判読画像の割れ目抽出に基づいて作成されたトレスマップと従来手法に基づくトレスマップを示す。これらのトレスマップは、水平坑道の区間毎の結果のうち側壁部分について結合することにより作成される。判読画像に基づき作成した各区間のトレスマップを結合する際、区間毎の割れ目の連続性の判断は、従来手法のトレスマップ

プに基づいた。6.4 節に示した通り、従来手法による割れ目観察では、スプリングラインと交差する概ね 1 m 以上の割れ目が記載対象である。再現性の評価にあたっては、従来手法のトレースマップにおける 1 m 以上の割れ目を判読画像から抽出できたか否かが、ひとつの評価指標になる。よって、従来手法に基づくトレースマップ（図 3.6-1b）に示された割れ目のうち、スキャンラインとの交差の有無は関係なくトレース長が 1 m 以上の割れ目を‘抽出すべき割れ目’として定義し、これらの割れ目に対して点群に基づく割れ目の属性情報を比較した。ただし、1 m 以上の割れ目であっても、割れ目方位が計測されていない割れ目は比較対象から除外した。図 3.6-1 において、‘抽出すべき割れ目’は、A と記した太い実線の割れ目である。

割れ目の分布位置については、それぞれの割れ目の位置の差（距離）ではなく、そこに割れ目が存在したか否かという観点から比較した。すなわち、‘抽出すべき割れ目’に対して抽出できた割れ目の頻度を比較した。なぜなら、割れ目データとして位置が数 cm ずれることよりも、割れ目頻度が数%異なる方が、地質構造モデルの構築に与える影響ははるかに大きいからである。従来手法のトレースマップにおいて‘抽出すべき割れ目’の頻度は 250 条であり（図 3.6-1b）、そのうち、判読画像から抽出できた割れ目の頻度は 83.2%にあたる 208 条であった（図 3.6-1a）。

割れ目のトレース長の比較においては、従来手法に基づくトレース長に対して判読画像から抽出できたトレース長の割合、すなわち、トレース長の再現率を求めた。図 3.6-2 に、その再現率の頻度分布を抽出できなかった割れ目の頻度とともに示す。80%以上の再現率の割れ目は 75 条と最も頻度が高く、再現率が低くなるほど頻度も低くなる。抽出できなかった割れ目を除く再現率の平均は、68.7%であった。

割れ目方位の比較においては、走向と傾斜の組み合わせによって一つの面の方位が表されることから、走向と傾斜を別々に比較することは好ましくない。図 3.6-3 に、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位の差に関する模式図を示す。それぞれの面には上向きの法線がある。割れ目方位の比較の指標を一つにすることが最適であるため、それぞれの割れ目面の法線がなす角（以下、「法線のなす角」）を比較の指標とする。法線のなす角を求める際に

は，法線を完全に交差させて低角の方を採用する。すなわち，法線のなす角は 0° から 90° の範囲にある。図 3.6-4 に，割れ目方位の比較結果として，法線のなす角の頻度分布を示す。法線のなす角が 0° から 10° の範囲が最も頻度が高く，ほとんどの割れ目は 30° 以下であった。図 3.6-5 に，点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位のすべてを，それぞれのステレオネットに分けてプロットした結果を Fisher 分布に基づくプロットの集中度のコンターとともに示す。それぞれのステレオネットが示す卓越方位の第 1 ピークの差は傾斜が 6° ，傾斜方位が 2° であり，第 2 ピークの差は傾斜が 3° ，傾斜方位が 0° であり，いずれもその差は僅かであった。

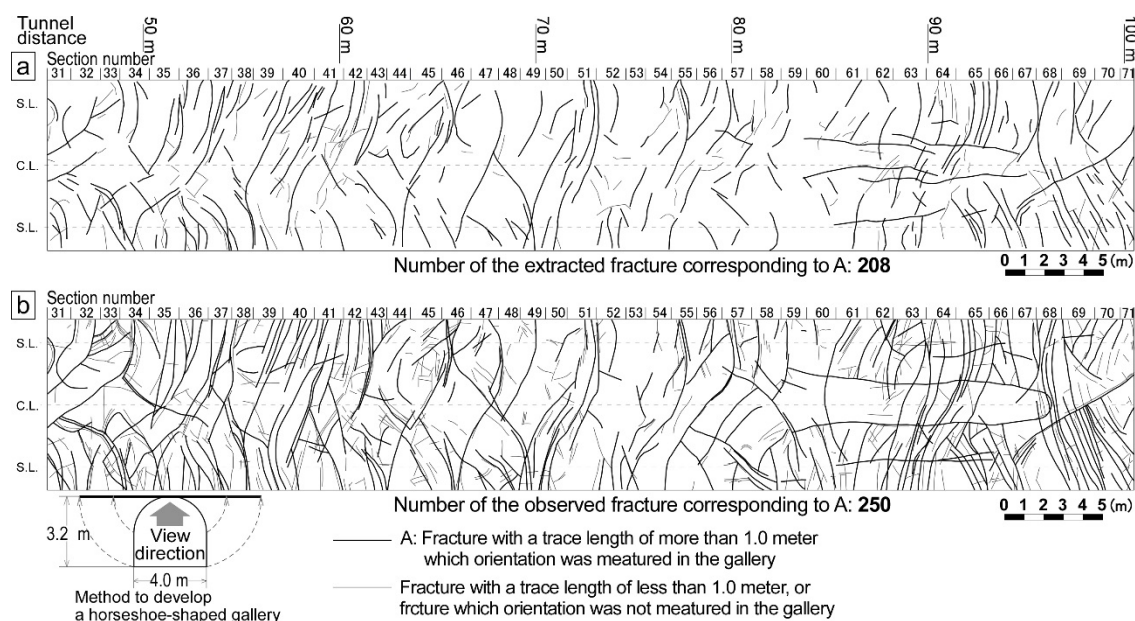


図 3.6-1 割れ目のトレースマップ

(a)点群から生成した判読画像に基づくトレースマップ，(b)現場における目視観察によって取得されたトレースマップ

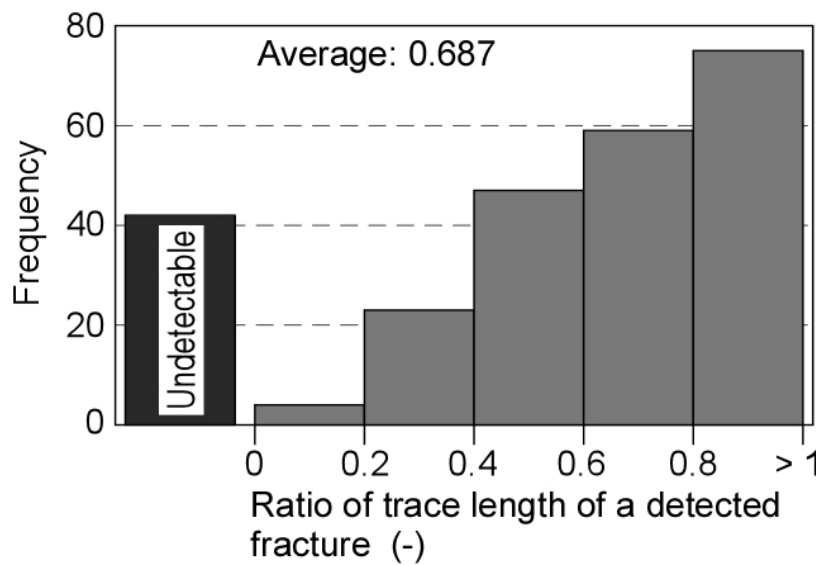


図 3.6-2 調査員が観察した割れ目のトレース長に対する判読画像から抽出した割れ目のトレース長の割合のヒストグラム
黒いバーは、判読画像から抽出できなかった割れ目の頻度を示す。

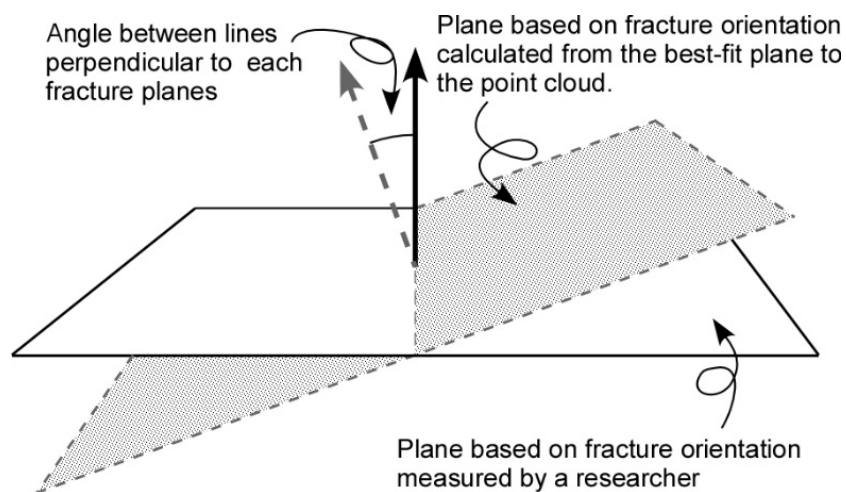


図 3.6-3 調査員が計測した割れ目方位と点群へのフィッティングにより求めた割れ目方位の差（二つの面の法線のなす角）の概念

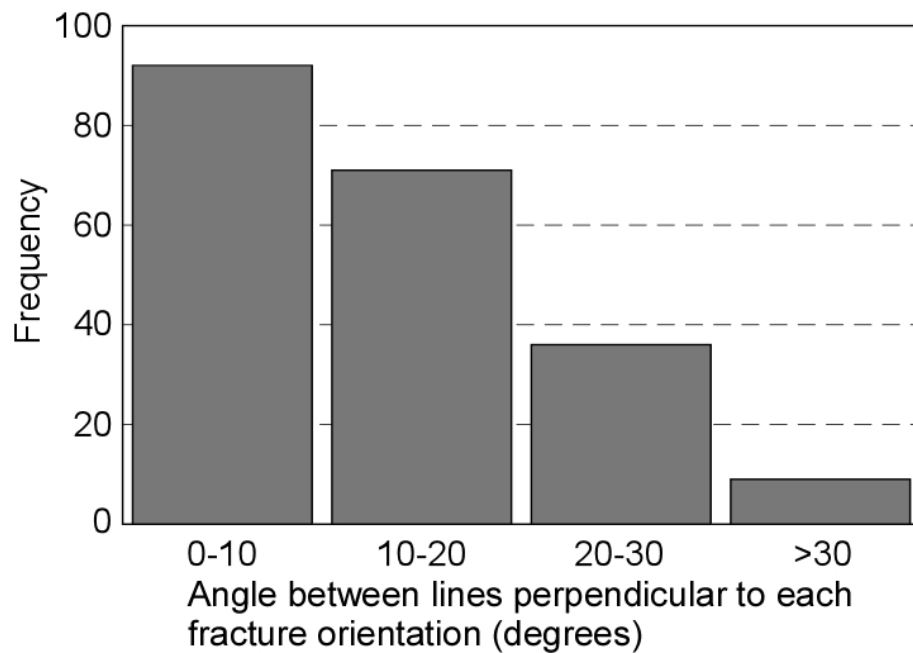


図 3.6-4 調査員が計測した割れ目方位と点群に基づく割れ目方位の法線がなす角の頻度図

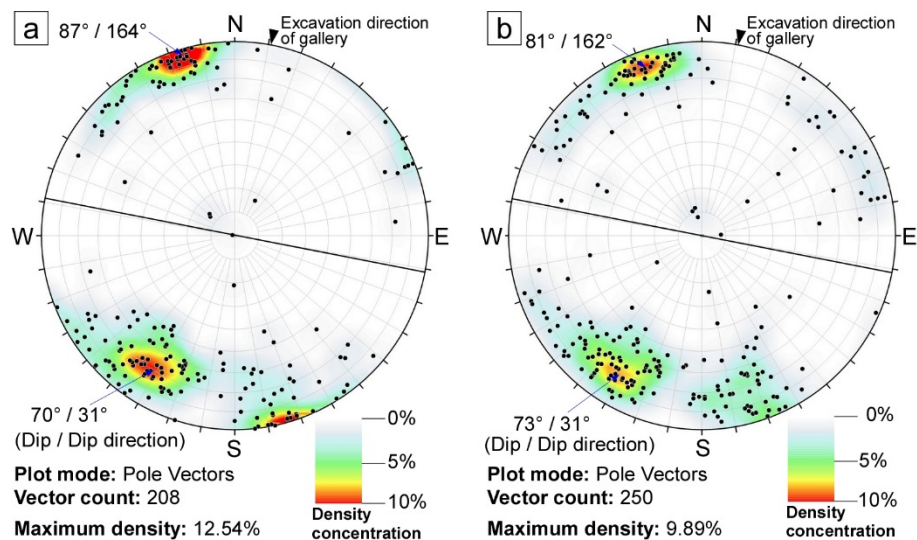


図 3.6-5 ステレオネット投影した割れ目方位

(a) 点群に基づく割れ目方位の極のプロット, (b)従来手法に基づく割れ目方位の極のプロット, 集中度のコンターはフィッシャー分布に基づく。下半球等積投影。ステレオネット上の実線は坑道の掘進方向と平行な面の極がプロットされる範囲を表す。

3.7 考察

3.7.1 点群に基づく割れ目の属性情報の再現性と割れ目の特徴の関係

本研究では、亀裂性岩盤である花崗岩を対象とした坑道掘削時の割れ目観察とレーザ計測の一事例ではあるが、坑道壁面形状を表す点群に基づく割れ目データの従来手法に基づく割れ目データに対する再現性に関する結果を得た。その結果に基づき、再現性の高い割れ目と低い割れ目のそれぞれの特徴について考察する。図 3.7.1-1 に、従来手法に基づくトレース長の頻度分布を示す。図 3.7.1-1a-d は、判読画像から抽出できた割れ目に対応しており、割れ目方位の比較の指標である法線のなす角別に分けられている。図 3.7.1-1e は、判読画像から抽出できなかった割れ目に対応している。判読画像から抽出できなかった割れ目のトレース長の頻度分布（図 3.7.1-1e）は、抽出できた割れ目に関する頻度分布（図 3.7.1-1a-d）と比較して、短いトレース長の割合が高く、3 m 以上のトレース長を有する長い割れ目はほとんど含まれていない。また、割れ目方位別のトレース長の頻度分布を比較すると、それぞれの全体に頻度は異なるが、法線のなす角が小さい割れ目ほど、トレース長の長い割れ目の割合が多い。図 3.7.1-2 に、従来手法によって取得された割れ目の充填鉱物の幅の頻度分布を示す。トレース長の頻度分布（図 3.7.1-1）と同様に区分している。判読画像から抽出できなかった割れ目に対応する頻度分布（図 3.7.1-2e）は、抽出できた割れ目に対応する頻度分布（図 3.7.1-2a-d）と比較して、充填鉱物の幅が小さい割れ目の割合が高く、2 mm 以上の充填鉱物の幅を有する割れ目はほとんど含まれていない。また、割れ目方位別に比較すると、法線のなす角が小さい割れ目ほど、2 mm 以上の充填鉱物の幅を有する割れ目の割合が高い。図 3.7.1-3 においても、上記に示した頻度分布と同じ区分で、グラウトが認められた割れ目の割合（以下、「グラウト割合」）を示す。判読画像から抽出できなかった割れ目のグラウト割合は、20%程度であり、法線のなす角が 30° 未満の割れ目に対応する割合と比較して明らかに低い。また、割れ目方位に関して、法線のなす角が 30° 以上のグラウト割合は、それ以下のグラウト割合と比較して極端に低い。以上のことから、再現性の低い割れ目の特徴は、トレース長が短く、充填鉱物やグラウトをあまり介在しない傾向があるため、おそらく割れ目面の密着性が強いと考えられる。一方、再現性の高い割れ目の特徴についてはその反

対であり、トレース長が長く、充填鉱物やグラウトをよく介在する傾向があるため、割れ目面の密着性は弱い、部分的には開口していると考えられる。判読画像から抽出できなかった 42 条の割れ目に対して、その原因を検証するために、従来手法に基づくトレスマップと写真および判読画像を参照した。その結果、以下のことが原因として挙げられる。

- ① 割れ目面の露出が小さい、もしくは、割れ目面の形状が不明瞭である。・・・
85.7% (36 条)
- ② 割れ目間隔が狭く壁面形状が複雑である。・・・4.8% (2 条)
- ③ 観察範囲の境界付近に位置する割れ目であり、前区間の吹付コンクリートに一部覆われるなどの原因により、割れ目の露出が不明瞭である。・・・9.5%
(4 条)

抽出できなかった割れ目の特徴は、トレース長が短く割れ目面の密着性が強い割れ目であるため、発破直後において坑道壁面上に割れ目面が露出しにくかったと考えられ、やはり、①の原因が大半を占めている。また、抽出できなかった割れ目の中には、湧水により坑道壁面が著しく濡れることによって生じる点群の部分的な欠損や著しいノイズによる原因が相俟って、判読画像からの割れ目抽出がより難しくなっている割れ目も存在した。

トレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7% であり、必ずしも高いとは言えない結果であった。充填鉱物やグラウトをよく介在し、坑道と完全に交差するような大きさの割れ目であっても、部分的には密着性が強い。そのため、判読画像において識別できる程度の割れ目面が、割れ目の端から端まで露出することは稀である。さらに、充填鉱物やグラウトをよく介在する開口性の割れ目は湧水を伴う傾向があるため、その割れ目近傍では点群にノイズが生じやすい。これらの理由から再現率があまり高くなかったと考えられる。

割れ目方位の再現性についても同様であり、トレース長、充填鉱物の幅、グラウト割合との関係から、割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存する。しかし、割れ目の特徴以外に、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位の両者には、計測誤差が含まれることを理解する必要がある。3.4 節

で述べたとおり，調査員が行う簡易計測では，鋼製支保などの帯磁性資材の影響を避けるため，クリノメーターの代わりに分度器が使用されている。また，天盤からの落石による労働災害防止のため，必ずしも調査員は，分度器を直接岩盤にあてた計測を行うことができない。そのため，通常の野外での地質調査の時よりも若干大きい数°から十数°程度の計測誤差が生じていると考えられる。一方，点群から求められる割れ目方位の計測誤差は，壁面形状の精密性よりも，反射ターゲットに入力する東西南北座標系の正確性に依存する。本研究の場合，反射ターゲットに入力された東西南北座標系の値は，現場で測量された厳密な値ではなく設計上の数値であるため，数°程度の計測誤差が生じていると考えられる。割れ目方位の真値を知ることができないため，正確な計測誤差を見積もることはできないが，両者にはある程度の計測誤差が存在する。そのような状況であっても，両者の卓越方位にほとんど差が無かったことから，点群に基づく割れ目方位は概ね妥当であったと推測する。しかしながら，割れ目方位を計測するためには，判読画像から割れ目を抽出できることが前提条件であり，この意味からも，割れ目方位の再現性は，割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存する。

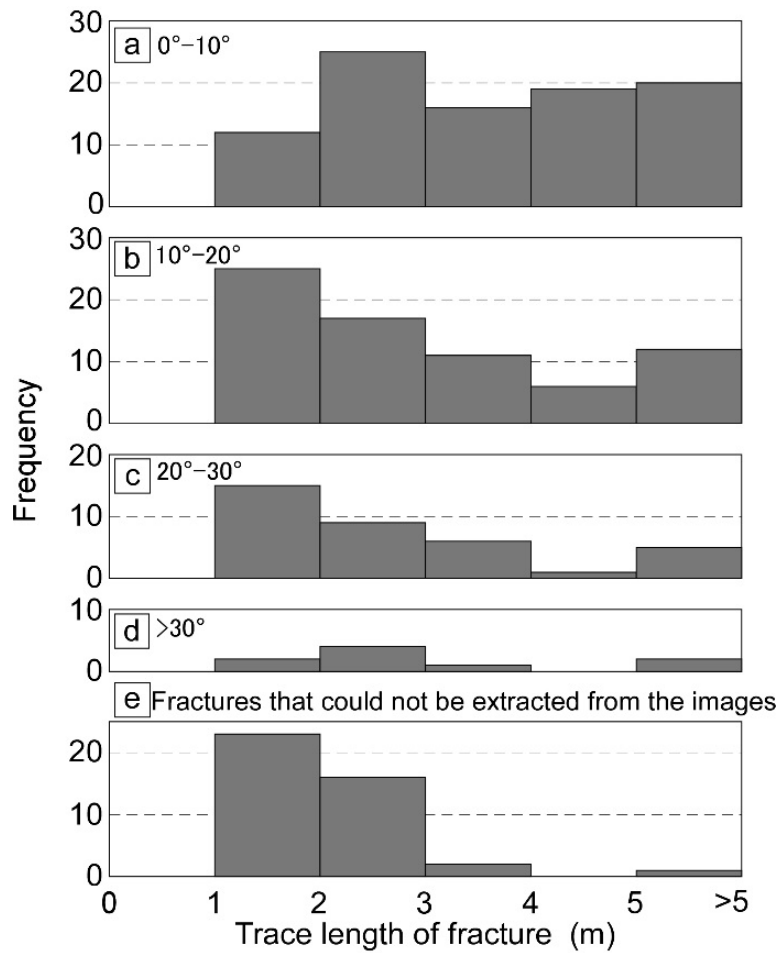


図 3.7.1-1 割れ目のトレース長の頻度図（なす角別）

トレース長は図 3.2-1 に示した割れ目分布図に基づく。これらのヒストグラムは、図 3.6-3 に示す調査員が計測した割れ目方位と点群へのフィッティングにより求めた割れ目方位の差（二つの面の法線のなす角）毎に示している：(a) 0-10°; (b) 10°-20°; (c) 20°-30°; (d) >30°; and (e) 判読画像から抽出できなかった割れ目

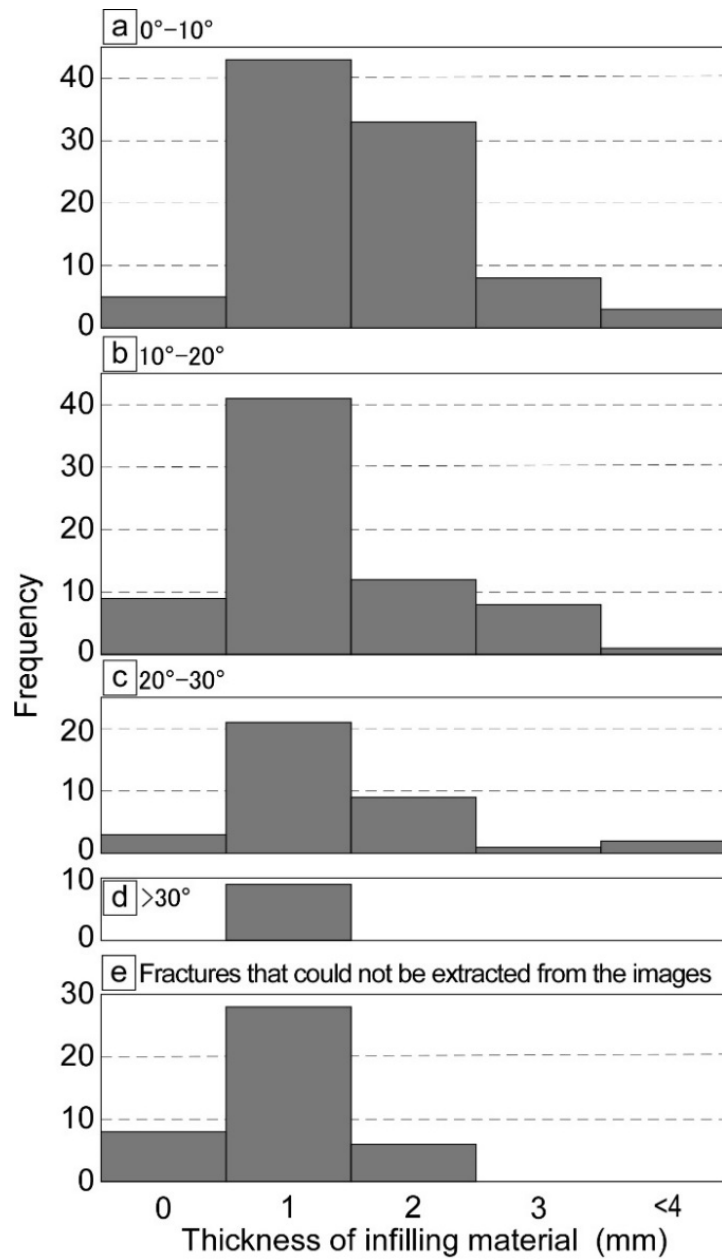


図 3.7.1-2 割れ目の充填鉱物の幅の頻度図（なす角別）
 充填鉱物の幅は，川本ほか，2012 の結果を参照した。これらのヒストグラムは，図 3.6-3 に示す調査員が計測した割れ目方位と点群へのフィッティングにより求めた割れ目方位の差（二つの面の法線のなす角）毎に示している：(a) 0-10°；(b) 10° -20°；(c) 20° -30°；(d) >30°；and (e) 判読画像から抽出できなかった割れ目

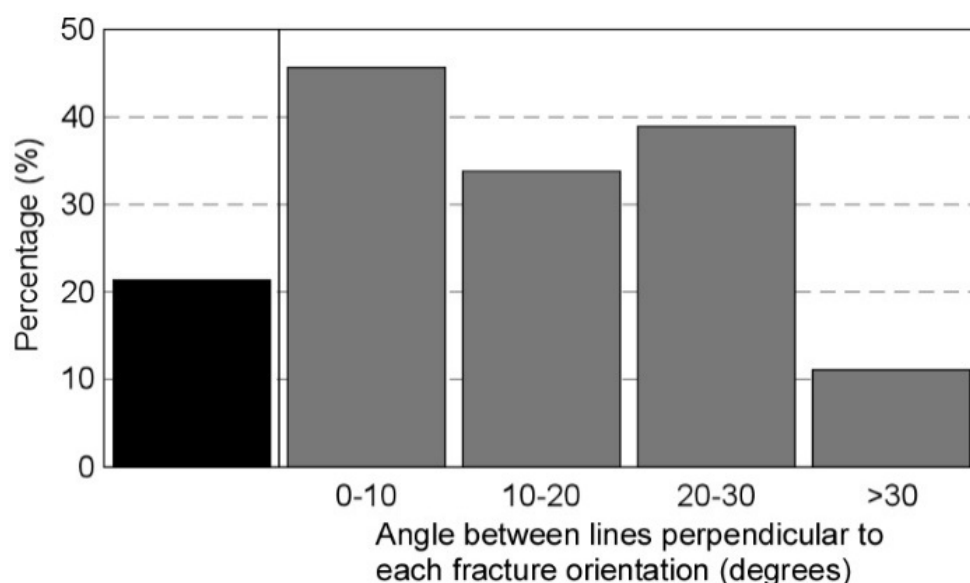


図 3.7.1-3 グラウトが介在する割れ目の割合（なす角別）
黒いバーは判読画像から抽出することができなかった割れ目を表している。

3.7.2 地質構造モデルの構築および水理解析への影響

ここでは、点群に基づき取得した割れ目属性情報を従来手法に基づくデータの代替として地質構造モデルの構築や水理解析に用いる場合の影響について考察する。亀裂性岩盤に対して構築される地質構造モデルのひとつは、個々の割れ目を確率論的に発生させて構築される割れ目ネットワークモデルである。点群に基づき取得した分布位置から求められる割れ目頻度、トレース長および割れ目方位は、そのモデル構築の際に必要なパラメータである。割れ目方位に関しては、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位のそれぞれの卓越方位を比較した結果、その差は僅かであった（図 3.6-5）。よって、割れ目方位がモデル構築に影響することはない。一方、点群から抽出できた割れ目の割合は 83.2%であり、さらにトレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7%であった（図 3.6-2）。よって、地質構造モデルでは、割れ目頻度から換算される 3 次元割れ目密度とトレース長から推定される割れ目サイズが過小評価される。しかしながら、これらの過小評価が水理解析に与える影響は少ない。なぜなら、水理解析では、モデル化の対象が透水に寄与する割れ目に限定されるためである。本研究が対象とした岩盤等級で B 級岩盤は、主立坑に沿った高角度傾斜の断層から約 40m 程度以上離れた範囲に分布しており（図

3.7.2-1), 深度 300 m 研究アクセス坑道の先行ボーリング調査 (図 3.7.2-1 に示す 08MI13 孔) では, 1,000 L/min を超える湧水が複数認められたため, 坑道掘削前にプレグラウチングが実施された (見掛ほか, 2010)。その後の割れ目観察では, 湧水が認められた割れ目のほとんどにグラウト材の充填が認められた (図 3.7.2-2) (Ishibashi *et al.*, 2016)。グラウトが充填されている割れ目は, 坑道と完全に交差する程度のトレース長を有し, さらに, 炭酸塩鉱物の充填といった開口性の特徴を有するなど透水性割れ目に関連付けられている (Hayano *et al.*, 2008; 石橋ほか, 2014)。このような特徴は, 再現性の高い割れ目の特徴と一致する。個々の割れ目の透水性を定量的に測定することは, 基本的に難しいため, 再現性の良い割れ目の透水性を正確に評価することはできないが, 先行ボーリングにおいて数から 10m 程度の透水試験区間が設定され, 試験が行われている。その結果, それらの区間の透水量係数は, 10^{-7} から 10^{-5} m^2/s の範囲であった (図 3.7.2-2) (Ishibashi *et al.*, 2016)。おそらく坑道と完全に交差するような割れ目が主要な水みちとして機能していると考えられ, そのような割れ目が各試験区間と交差している頻度は, 壁面観察の結果から見積もっても長さ 10m 程度の試験区間で多くても 5 条程度である。これは, 試験区間の透水量係数の桁を大きく変えるほどの頻度ではない。よって, 点群から割れ目の観察データが精度よく再現される坑道と完全に交差するような大きな割れ目の個々の透水量係数は, 10^{-7} から 10^{-5} m^2/s の範囲にあると言える。

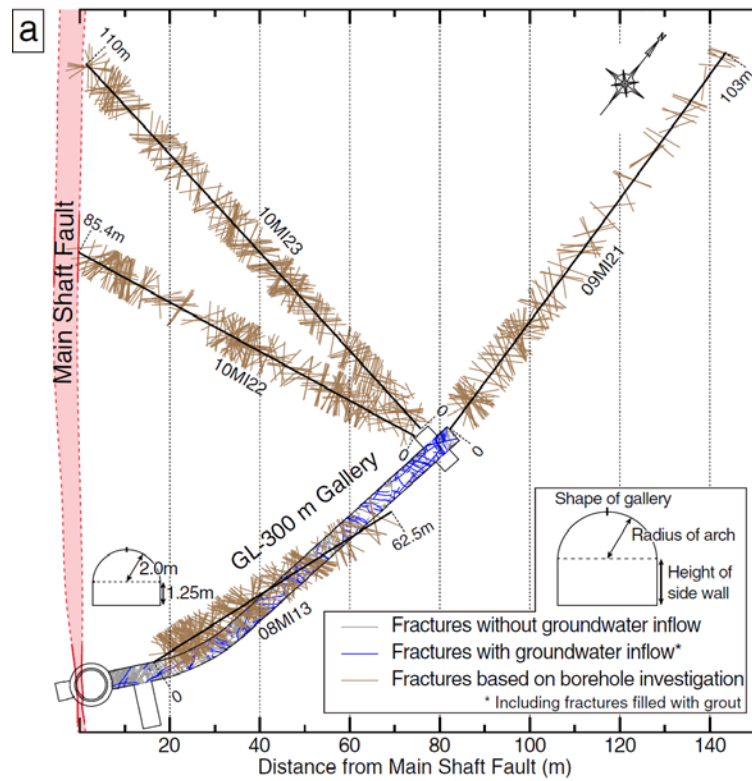


図 3.7.2-1 坑内ボーリング調査と坑道壁面の割れ目観察に基づく 300m 研究アクセス坑道周辺の割れ目の分布 (Ishibashi *et al.*, 2016 の Fig. 2 の一部を抜粋)

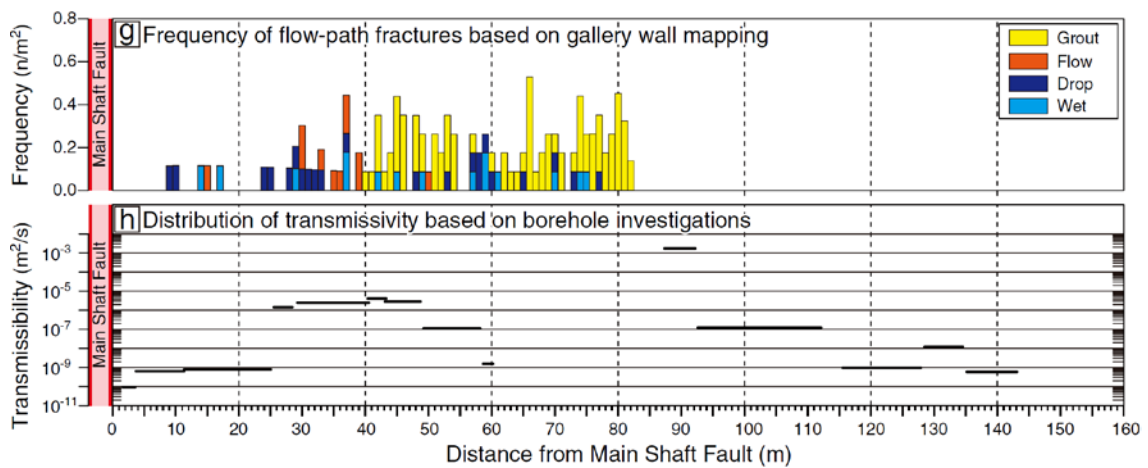


図 3.7.2-2 300m 研究アクセス坑道に分布する湧水割れ目の頻度と透水量係数の分布 (Ishibashi *et al.*, 2016 の Fig. 4 の一部を抜粋)

3.8 まとめ

大規模な地下施設建設プロジェクトの坑道掘削時に実施される割れ目観察が、調査員の目視観察とクリノメーターなどを使用した割れ目方位の簡易計測といった従来手法に基づく場合、観察時間の短縮、データ品質の平準化およびデータ取得精度の維持の三つの課題が生じる。これらの課題解決には、レーザ計測の適用が有望である。しかしながら、十数 m 以上の長さの坑道を対象としてレーザ計測を行い、そのデータに基づく割れ目データと従来手法に基づく割れ目データを比較した事例が存在しない。そのため、それがどの程度従来手法に基づく割れ目データを再現できるのか分かっていない。本研究では、これを確認することを目的として、はじめに、レーザ計測データである点群から割れ目データを取得する方法を検討した。つぎに、検討した方法を、レーザ計測と割れ目観察が並行して行われた瑞浪研究所の深度 300m 研究アクセス坑道の長さ 55.4 m の区間に適用して割れ目データを取得し、従来手法に基づく割れ目データと比較した。本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) ArcGIS の地形分析ツールを使用して、坑道壁面形状を表す点群から割れ目を抽出するための判読画像を生成し、それに基づき割れ目の分布位置とトレース長を示すトレスマップを作成する方法が構築された。さらに、トレスマップにおいて抽出した割れ目に対応する点群に基づき割れ目方位を算出する方法が構築された。
- (2) 点群に基づくトレスマップでは、割れ目観察の記載基準である 1 m 以上のトレース長を有する 250 条の割れ目のうち、83.2%にあたる 208 条が抽出され、トレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7%であった。点群に基づく割れ目方位は、従来手法に基づく割れ目方位と比べても遜色ない。
- (3) 点群に基づく割れ目データの再現性は、割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存しており、透水に寄与しないトレース長が短く密着性の強い割れ目の再現性は低い。一方で、透水に寄与しない割れ目は、水理地質構造モデルで考慮されないため、点群に基づく割れ目データをそのまま用いても水理解析結果に与える影響は小さい。

第 3 章の参考文献

- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N. and Vigui r, F. (2014):
Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser
scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear
outcrop inspection, *Journal of Structural Geology*, 66, pp.102-114.
- Fekete, S., Diederichs, M. and Lato, M. (2010): Geotechnical and
operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and
blast tunnels *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25,
pp.614-628.
- Fekete, S. and Diederichs, M. (2013): Integration of three-dimensional laser
scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels
in blocky rockmasses *International Journal of Rock Mechanics and
Mining Sciences*, 57, pp.11-23.
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分
の技術と安全性，原子力発電環境整備機構技術報告書，NUMO-TR-04-01.
- Gigli, G. and Casagli, N. (2011): Semi-automatic extraction of rock mass
structural data from high resolution LIDAR point clouds,
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48,
pp.187-198.
- Hayano, A., K. Nakamata, T. Tsuruta and S. Takeuchi (2008): Relationship
between fractures and flow paths in granitic rock at the Mizunami
Underground Research Laboratory site, The 36th IAH Congress,
Proceedings of 36th IAH Congress 2008.
- 石橋正祐紀，安藤友美，笹尾英嗣，湯口貴史，西本昌司，吉田英一（2014）：
深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学
的特徴 ―土岐花崗岩を例として―，*応用地質*，第 55 巻，第 4 号，
pp.156-165.
- 石橋正祐紀，栗原新，松岡稔幸，笹尾英嗣（2012）：超深地層研究所計画にお
けるサイトスケール地質構造モデルの構築；第 2 段階における Shaft180
から Stage300 地質構造モデルへの更新，日本原子力研究開発機構，

JAEA-Research 2012-018.

Ishibashi, M., Yoshida H., Sasao, E., Yuguchi, T. (2016): Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: An example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, *Engineering Geology*, 208, pp.114–127.

岩盤分類基準化委員会（編）（2004）：新規制定地盤工学会基準・同解説 岩盤の工学的分類方法（JGS3811-2004），社団法人地盤工学会，pp.54-56.

川本康司，窪島光志，石橋正祐紀，鶴田忠彦，笹尾英嗣，池田幸喜，見掛信一郎，原郁夫，山本勝（2012）：超深地層研究所計画，瑞浪超深地層研究所研究坑道の壁面調査データ集，日本原子力研究開発機構，JAEA-Data/Code 2012-009.

Lai, P., Samson, C. and Bose, P. (2014): Visual enhancement of 3D images of rock faces for fracture mapping, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, pp.325-335.

Lato, M., Hutchinson, J., Diederichs, M., Ball, D. and Harrap, R. (2009): Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, pp.935-946.

Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J. and Harrap, R. (2009): Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, pp.194-199.

Lato, M. J. and Vöge, M. (2012): Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 54, pp.150-158.

Mah, J., Samson, C. and McKinnon, S. D. (2011): 3D laser imaging for joint orientation analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, pp.932-941.

見掛信一郎，山本勝，池田幸喜，杉原弘造，竹内真司，早野明，佐藤稔紀，武田信一，石井洋司，石田英明，浅井秀明，原雅人，久慈雅栄，南出賢司，

- 黒田英高，松井裕哉，鶴田忠彦，竹内竜史，三枝博光，松岡稔幸，水野崇，大山卓也（2010）：結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察，日本原子力研究開発機構，JAEA-Technology 2010-026.
- 持田裕之，天野健治，鶴田忠彦（2007）：3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試み—瑞浪超深地層研究所に分布する瑞浪層群での適用事例—，応用地質，第 48 巻，第 3 号，pp.126-131.
- 森田豊・渡辺邦夫（2003）：断層の透水異方性に着目したフラクチャーネットワーク地下水流動解析，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，No.32，pp.365-370.
- 日本原子力研開発機構（JAEA）（2016）：
<https://www.jaea.go.jp/04/tono/jigyoku/160420/h28gaiyo.pdf>.
- 佐々木圭一，太田久仁雄（2004）：大縮尺の空中写真により判読したリニアメントに関する検討-東濃地域における事例研究-，核燃料サイクル開発機構，JNC-TN7400 2004-007.
- Sasao, E., T. Yuguchi, Y. Ito, T. Inoue and M. Ishibashi (2015): Formative mechanism of inhomogeneous distribution of fractures, an example of the Toki Granite, Central Japan, 10th Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG ARS 2015) (USB Flash Drive).
- 塩野清治，升本眞二，弘原海清（1990）：パソコンによる地質図学演習，共立出版，pp.5-38.
- Sturzenegger, M. and Stead, D. (2009): Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts, Engineering Geology, 106, pp.163-182.
- 竹内真司，竹内竜史，安藤賢一（2013）：亀裂性岩盤を対象とした孔間水理試験に基づく水理地質構造の推定，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要，No.48，pp.95-110.
- 鶴田忠彦，笹尾 英嗣（2016）：瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削に伴って実施した壁面地質調査，応用地質，Vol. 56，No. 6，p. 298-307.

- 鶴田忠彦, 田上雅彦, 天野健治, 松岡稔幸, 栗原新, 山田泰広, 小池克明 (2013):
瑞浪超深地層研究所における深部地質環境のモデル化を目指した地質学的調査, 地質学雑誌, 第 119 巻, 第 2 号, pp.59-74.
- Wang, G., Feng, Q. and Roshoff, K. (2009): A new approach to tunnel digital geological mapping using 3D terrestrial laser scanning technique, In ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009. International Society for Rock Mechanics.
- 湯口貴史, 鶴田忠彦, 西山忠男 (2010): 中部日本土岐花崗岩体の岩相と化学組成の累帯変化, 岩石鉱物科学, 第 39 巻, 第 2 号, pp.50-70.

第4章 地層処分事業における坑道壁面の地質観察の重要性

4.1 背景

地層処分事業において実施される壁面観察に対して、レーザ計測の適用性を検討する前提として、壁面観察において取得すべきデータと壁面観察の重要性を理解しておく必要がある。すなわち、壁面観察により取得されるデータが、処分場の設計や安全評価の過程の中で、どのように用いられるのか明らかにする必要がある。地層処分事業における処分場のサイト選定のプロセスは、「概要調査地区の選定」、「精密調査地区の選定」、「最終処分施設建設地の選定」の三段階の選定過程を経て、処分施設建設地が決定される。この三つの選定はそれぞれ文献調査、概要調査、精密調査の結果に基づき行われる（図 1.1-2）。具体的な現地調査は、精密調査地区選定段階に実施される概要調査から開始される。壁面観察は、精密調査後半の調査坑道掘削時さらには処分場建設段階の坑道掘削時に実施されることが想定されるが、調査対象となる自治体が決まっていないう現段階においては、概要調査段階の調査や評価を対象とした検討が実施されており、精密調査段階移行の概要は、例えば、実施主体である NUMO が 2011 年に公表した報告書「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）」（NUMO, 2011）などに示されているが、具体的な検討は未だ開始されていない。

NUMO と JAEA は、概要調査段階における処分場の設計・性能評価に関連する主要な技術テーマについて、JAEA がこれまで蓄積してきた技術やノウハウを、NUMO が今後行う精密調査地区の選定等の処分事業に適用できるよう、実施主体の視点に沿って実用化を図っていくための具体的な考え方と進め方を策定するとともに、必要な開発課題と今後の計画を明らかにすることを目的とした共同研究を実施した（例えば、JAEA, 2012）。その中で、母岩特性のうち水理場に着目し、母岩特性を評価するための項目、および地下水移行時間の評価手法について、地質環境の調査・解析と関連付けた整理が行われた。ここでの「母岩」とは、地下施設を建設し廃棄体を埋設する対象となる岩体（または地層）のことを指す。母岩としての適性は、地質環境の調査による地質環境モデルなどの情報に基づき、熱環境、水理場、力学場、化学環境などの処分場の設置環境の観点、および、岩体ある地層の広がりや施工性・経済性など、事業の

成立性の観点から評価される（表 4.1-1）（NUMO, 2011）。母岩の選定の概略的な手順は、図 4.1-1 に示す通りである。母岩の適性を評価するための具体的な評価項目の検討に際しては、安全評価や処分場の概念設計にとって重要な項目と、調査などで取得する情報に基づき評価可能な情報を関連付けた整理が重要である（Vomvoris *et al.*, 1996; Ström *et al.*, 1999; Andersson *et al.*, 2000）。また、長期間にわたる地層処分事業では、安全評価や施設の設計・施工の一貫性を保つために、母岩の適性の評価項目を次段階の精密調査段階において想定される評価項目と同様にしておく必要があると考えられる。そのため、母岩の適性を評価する方法論を整理する際には、まずは、調査の初期段階である概要調査の段階を対象にすることが望ましい。しかしながら、概要調査段階においては、得られる地質環境に関する情報量が、項目、数量ともに限られ、地下環境が本来有する地質学的な不均質性に起因する場の理解の不確実性が大きいと考えられる。特に、水理場については、断層や割れ目などの岩盤の透水性に影響を与える構造が不均質に分布し、その透水性の分布も数桁にわたってばらつく可能性があることから、力学場、熱環境、化学環境などの評価に比べて不確実性を伴いやすいと考えられる。そのため、水理場の観点からの母岩適性評価においては、調査の進展に伴って変化する調査データの取得状況、地質環境の理解の度合いや地質環境モデルの不確実性に対して柔軟に対応するために、方法論の整備においてはオプションを示すことが望ましい。

表 4.1-1 地下施設設置位置の設定のための評価項目の例（NUMO，2011）

| 評価項目 | 評価指標の例 | 評価に必要な情報 |
|---|---------------------------------|--|
| 【熱環境】 閉鎖後の処分場の温度が低いこと | 廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化 | 岩盤特性モデル、廃棄体の発熱量、地温勾配、岩盤の熱特性など |
| 【力学場】 坑道の力学的安定性が確保できるとともに、閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること | 岩盤特性に基づく坑道離間距離や支保の仕様 | 岩盤特性モデル、初期地圧、側圧比、岩盤の力学特性、地山強度比など |
| 【水理場】 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく、緩慢であること | 地下水移行経路長、地下水移行時間など | 水理地質構造モデル、地質環境の長期変遷評価結果、動水勾配、地温勾配、地下水組成、透水係数、有効間隙率、地下水流向 |
| 【化学環境】 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶性と人工バリアの安定性に適していること | 地下水化学特性に基づく人工バリアの長期挙動 | 地下水化学モデル、酸化還元電位、地下水のpH、地下水組成、鉱物組成など |
| 【母岩の広がり】 処分場を収容できる面積（容積）を有するとともに、処分パネルを効率的に配置できる形状を有すること | 処分場の規模、処分パネルの数・形状 | 地質構造モデル、母岩の空間的な広がり、断層・破碎帯の分布など |
| 【工程・経済性など】 工程確保の見通しがあるとともに、経済性が確保されること | 建設工程、操業工程、建設費の概算結果など | アクセス坑道の延長距離、処分形態や処分坑道断面の仮設定情報 |

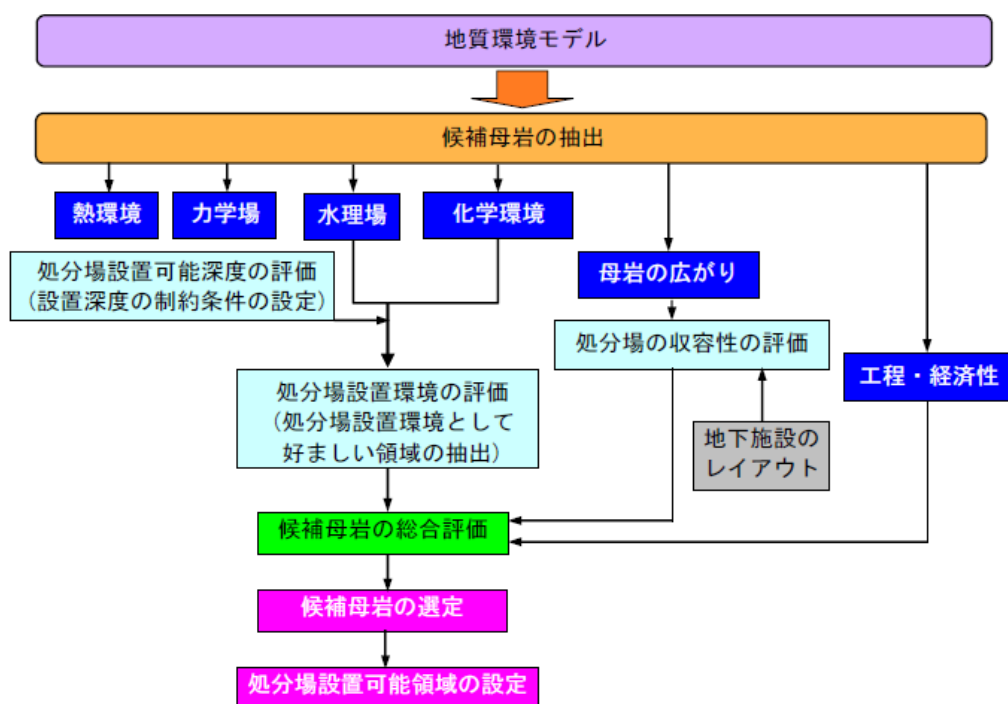


図 4.1-1 母岩の選定ならびに処分場設置可能領域の設定の流れ（NUMO，2011）

4.2 目的と実施内容

本章では、レーザ計測が地層処分事業の壁面観察に対する適用性の評価を可能にするために、地層処分事業のサイト選定プロセスの中で実施される水理場の観点での母岩適性評価に着目して、壁面観察によって取得されるデータの位置づけと重要性を明らかにする。

はじめに、国内の地下研究施設における調査事例と国外の処分事業で先行しているスウェーデンの事例に基づき検討された母岩の性能を評価する項目のうち、水理の観点から母岩の適性を評価するために有効と考えられる評価項目について整理する（4.3 節）。つぎに、抽出した評価項目のうち、「地下水移行時間」を対象として方法論を整理する（4.4 節）。その際、概要調査のような調査の初期段階では、調査データやモデルの不確実性に柔軟に対応するために、オプションを示すことが重要であるため、これを示すことが可能な方法論の整理方法を提案する。つぎに、精密調査後半に実施される壁面観察によって取得される地質データと、ボーリング調査や地表踏査によって概要調査によって取得される地質データの関係性や壁面観察の重要性を二つの事例から示す。一つは、新第三紀塊状珪質泥岩を対象とした地質構造の概念モデル構築について（4.5.1 節）、もう一つは、ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能に着目した簡易的な適性評価の試行について（4.5.2 節）である。

4.3 水理の観点から母岩の適性を評価するための指標

母岩の核種閉じ込め性能の評価の観点からみた水理特性に関する評価項目の例を、表 4.3-1 に示す。これらの項目は、JAEA が進めている幌延深地層研究計画の地上からの調査段階における地下施設周辺の性能を評価する手法の基礎的検討の一環として整理されたもの（稲垣ほか、2012）から、水理に関する項目を抜き出したものである。これらの項目は、地下水流束を表すパラメータと、移行経路に関するパラメータに大別することができる。

地下水流束に関連する項目としては、例えば、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」（JNC, 1999）では、緩衝材中の核種移行を評価するモデルの外側境界条件の指標として用いられた、掘削影響領域通過流量があげられる（JNC,1999a, b）。

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）が実施したフォルスマルクにおける使用済燃料の最終処分場の長期安全性に関わる安全評価プロジェクト（SR-Site）（SKB, 2011）の例では、緩衝材と岩盤の接触面における等価流量（ Q_{eq} 値）がある。 Q_{eq} 値は、処分孔に交差する割れ目の透水性と周辺の地下水の圧力状態等により決定される。 Q_{eq} 値は、移行抵抗値（ F 値）の評価、処分孔への地下水の浸入により飽和・膨潤する緩衝材の健全性（浸食等）の評価など、地圏（天然バリア）と緩衝材の安全機能の確保に関連する指標である。また、 F 値とは、地下水流動に関連する移行抵抗値（hydrodynamic transport resistance もしくは F -factor: Andersson *et al.*, 1998）のことであり、亀裂媒体中を移行する溶質のマトリクス拡散による保持能力に関する性能を定量化したものである。 F 値は流動寄与面積とダルシー流束の比として定義される。ある流束に対して流動寄与面積が大きくなれば、 F 値が大きくなり、溶質の保持能力が高くなる。本検討では、それらの指標を算出するための基礎的な情報として処分坑道周辺のダルシー流束を評価項目に挙げた。なお、処分坑道周辺のダルシー流束は放射性物質の閉じ込め機能の観点だけではなく、施設の設計や施工の観点においても重要な項目である。例えば、SR-Site では人工バリアの安定性の評価のひとつとして緩衝材の流出挙動を評価するための情報として用いられている（SKB, 2011）。

移行経路に関する項目としては、地下水移行時間、移行距離、地下水流速、間隙特性などがあげられる。SR-Site で用いられている F 値は、前述のとおり、亀裂性媒体を対象としたマトリクス拡散による遅延効果の評価に着目したパラメータである。岩種やサイトが特定されていない段階では、移行経路に関するより一般的な項目として地下水移行時間、移行距離、地下水流速、間隙特性を示した。これらは互いに相関する項目であるが、中でも地下水移行時間は、母岩の核種閉じ込め性能を表す指標として有効である。例えば、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成 3 年度－」（PNC, 1992）では、地下水が移行する時間に関するファクターと、核種半減期や遅延係数といった核種の特性を表すファクターの関係から、天然バリア中の核種の移行遅延に関する性能をより簡略的に求めることができることを示している（PNC, 1992）。また、核種の閉じ込め性能の評価対象となる移行経路としては、処分坑道から

地上に至る経路全体を基本としつつも、異なるスケールでの地質環境モデル（SDM: Site Descriptive Model）の不確実性を考慮したより柔軟な評価オプションとして処分坑道近傍や、処分坑道周辺の数十メートルから百メートル程度の規模などの複数の視点で設定することが有効と考えられる。

一方、地下施設の建設・操業・閉鎖の観点から母岩の特性を評価する上で重要となる様々な視点のうち、水理に関する項目としては、坑道や処分孔などの地下施設への湧水が重要な項目となる（NUMO, 2011）。例えば、SR-Site の処分場の地下施設の構成要素毎に整理された設計要件（Design premises: SKB, 2009）では、緩衝材施工性の観点から、前述の処分孔への湧水量基準に加えて、緩衝材施工後から飽和に至るまでの処分孔への湧水量が一定量を超えないことが基準として設定されている（SKB, 2011）。湧水の地下施設の建設や操業に与える影響としては、坑道施工性に与える影響と、緩衝材などの人工バリアの施工性に与える影響が考えられる。また、湧水の処分システムの長期性能に与える影響としては、地下施設周辺の水圧低下に伴い、人工バリアとその周辺岩盤の環境が変化することが考えられる。また、施工時の緩衝材や埋め戻し材が流出（パイピング）し、人工バリアの機能が低下することも考えられる。

表 4.3-1 母岩の核種閉じ込め性能の観点から利用可能と考えられる水理特性に関する評価指標の例（稲垣ほか, 2012 を修正・加筆）

| 評価項目 | | 具体的な例 |
|-----------------------|---------|---|
| 処分坑道近傍の地下水流速に関する項目 | ダルシー流束 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道（孔）近傍でのダルシー流束 ・ 緩衝材周辺の掘削影響領域通過流量（JNC,1999） ・ 緩衝材と岩盤の接触面における等価流量（Qeq 値）（SKB, 2011） ・ 地下水流動に関連する移行抵抗値（F値）（SKB, 2011） |
| 処分坑道から地表までの移行経路に関する項目 | 地下水移行時間 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道（孔）から地表に至る地下水移行時間 ・ 処分坑道（孔）から任意の移行距離や特定の水理地質構造上の境界までの地下水移行時間 |
| | 移行距離 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道（孔）から特定の水理地質構造上の境界や地表（生物圏）までの移行距離 |
| | 地下水流速 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道（孔）からの移行経路に沿った地下水の実流速（亀裂や粒子間隙中の地下水流速） |
| | 間隙特性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分坑道（孔）からの移行経路の間隙構造（亀裂性媒体：亀裂開口幅、接触面積率など、多孔質媒体：有効間隙率） ・ 地下水流動に関連する移行抵抗値（F値）（SKB, 2011） |
| | 地下水流出点 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地表での地下水流出点およびその環境 |

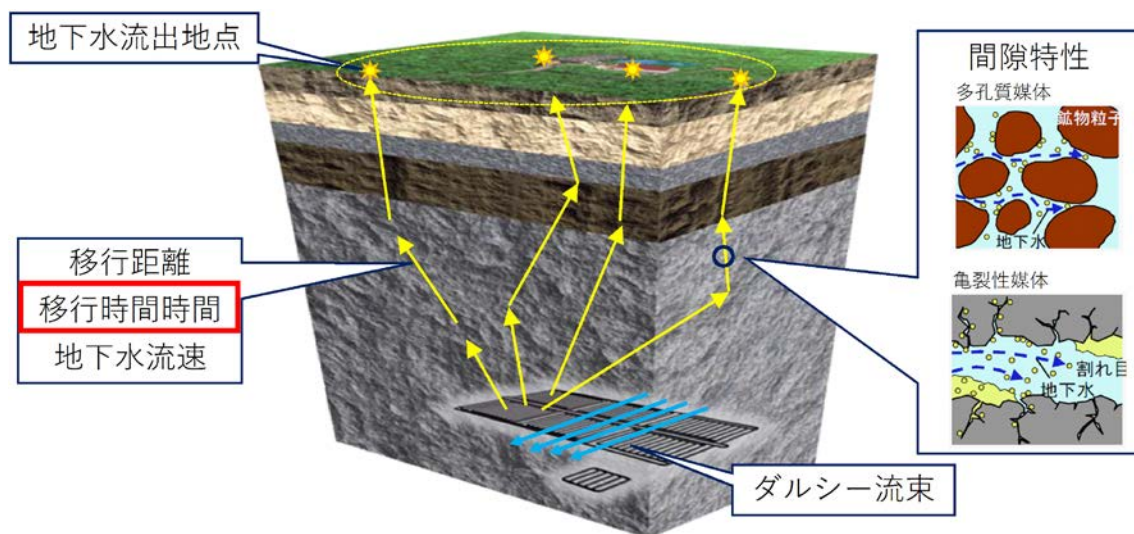


図 4.3-1 水理特性に関する評価指標の概念図

4.4 水理の観点から母岩の適性を評価するために必要な地質調査データ

評価ツリーの検討にあたっては、4.3 節で示した評価項目のうち、母岩の核種閉じ込め性能の観点から特に重要と考えられる地下水移行時間が対象となった。4.4.1 節では、評価ツリーの概要を述べる。4.4.2 節では、評価ツリーに基づき、水理の観点から母岩の適性を評価するために必要な地質調査データについて示す。評価ツリーの詳細なコンセプト、手法の整理方法、評価ツリーに示された個々のパラメータの設定手法の解説については、NUMO と JAEA の共同研究報告書（JAEA,2012, JAEA-Research 2012-032 ; JAEA, 2013, JAEA-Research 2013-037）を参考にされたい。

4.4.1 評価ツリーの概要

評価手法の整理には、評価項目として地下水移行時間を起点として、解析手法、パラメータの設定、データセットの整備、調査データと調査手法の関連を階層毎に整理する手法を適用することとした。調査手法やデータを起点としたボトムアップ的なデータの流れを表す「統合化データフロー」（例えば、三枝ほか、2007）や「調査システムフロー」（例えば、RWMC, 2010）は調査から得られるデータから評価項目の評価に至る一連の流れを分かりやすく表示できるものの、データ解釈やモデル設定上の複数の仮定に基づく代替ケースや代替

モデルによる複数の手法から評価項目を設定するためのオプションの整理には不向きである。そのため、評価項目として地下水移行時間を起点に、いわゆるトップダウン的なアプローチによる方法論の整理が行われた。その際、代替ケースや代替モデルといった複数の選択肢が系統的に示すための「評価ツリー」が提案された。評価ツリーの整備方法の概念を図 4.4.1-1 に示す。その選択肢は、想定しうる範囲を網羅的に揃えることが望ましい。その一方で、過去の経験に基づいて有効と考えられる選択肢を示すことが重要で、評価ツリーの整備として優先度が高い。地下水移行時間に限らず水理に関連する評価評価の場合、1次元モデルを用いた簡略的な評価と、3次元の水理地質構造モデルを用いた厳密な評価が最初の選択肢として評価ツリーに示される。

具体的な地質環境を対象とした地下水移行時間の評価は地形や地質構造などを含む3次元的条件に依存しており、地質環境の調査により構築される3次元地質構造モデルに基づいて評価されるのが一般的である。しかし、母岩を選定する手法整備の留意点として「簡略かつ保守的な評価手法の併用」が有効であり（ワークショップ「処分場の成立性、安全性の観点から岩盤特性を把握するための実際的アプローチの論点整理」の資料）、第2次取りまとめにおける母岩を対象とした核種移行評価の経験に基づき1次元モデルを用いる場合を本評価ツリーに併記することとした。その際、透水量係数の分布の推定方法に着目して、データ解釈上の複数の考え方を整理した。これは、第2次取りまとめの経験に基づけば、透水量係数のバラツキは数桁の範囲にわたり、また他のパラメータのバラツキの範囲に比べて核種移行遅延効果に与える影響が大きいことが分かっているためである（澤田，1999）。また、地下水移行時間を評価する対象となる移行距離についても、母岩の特性に着目する場合には「処分坑道（もしくは処分孔）周辺の数十メートルから百メートル程度の核種移行遅延性能にかかわる特性」に着目することが経験的に有効であると考えられるものの、安全確保の考え方に柔軟に対応できるように複数の選択肢を整理しておくことが肝要である。評価ツリーの基本的な構成を図 4.4.1-2 に示す。評価ツリーの整備にあたっては、以下のことに留意した。

- ・ 評価ツリーは基本的に左から「評価項目」、「モデル化・解析手法」「データセット」「調査データ」「調査手法」の順にそれらの関連を系統的に示す。
- ・ 「データセット」、「調査データ」、「調査手法」に対応するボックスの設定については、超深地層研究所計画の地表からの調査段階における統合化データフロー（三枝ほか，2007）を参考にした。
- ・ 評価ツリーのボックスに記述する内容に応じて，ボックスのスタイル（色・形）を使い分ける。ボックスのスタイルの定義は，表 4.4.1-1 に示す通りである。
- ・ 代替ケースや代替モデルのような複数の選択肢を設定する場合には，‘場合分け’と定義したボックスに解釈やモデル構築の前提や仮定を記述し，引き続くボックスには，その場合の実施内容を記述する。

経路を設定した上で評価を行うことを前提としている。一方、後者については、調査の進展に伴い場の理解が進み、具体的な地質・地質構造を対象に処分場レイアウトを考慮し、より現実的な地下水移行経路を設定することを前提としている。

(1) 1次元モデルに基づく評価の場合

1次元モデルに基づく解析の場合、地下水移行時間は、「評価地点までの距離（以下、移行距離）」を「移行経路上の流速（以下、流速）」で除することにより導かれる。

実際の地質環境における移行経路は、複数の地質構造や断層などを経て非常に複雑で長い経路となると考えられるため、複数の地質構造を含む大きなスケールの水理地質構造を考慮して設定されるような厳密な評価地点までの移行距離を求めることは困難である。ところが、特定のサイトを対象としない第2次とりまとめの評価における移行距離の設定では、複雑な地質構造は考慮せず、処分場から100m下流側に仮定した透水性の高い大規模な破碎帯を伴う主要な断層までの母岩の核種移行を対象とし、移行距離を保守的に最短距離の100mとした。調査の初期の調査段階や具体的な処分場のレイアウトを設定できない段階においては、母岩として期待する領域として地層境界または大規模断層までに至る経路や、数十メートルから百メートル程度の保守的な値を設定した評価を行うことが有効である。この段階の移行距離の設定では、具体的な地質調査データを必要としない。

移行経路に沿った流速は、透水性割れ目の透水量係数、透水性割れ目の開口幅および動水勾配から導かれる。これらのパラメータの中で、透水性割れ目の透水量係数の設定が最も重要である。結晶質岩のように岩石基質部の透水性が低く亀裂内の流れが支配的な亀裂性媒体中の水理や核種移行を評価するモデルとしては、一次元平行平板モデルが広く用いられている（例えば、Nagra,1994; SKB,1992）。第1次取りまとめでは均質な一次元平行平板モデルを用いた安全評価を実施している（PNC, 1992）。しかし、多くの場合、亀裂特性などの地質特性が不均質な岩盤に対して適用することになり、亀裂の透水性に平均値や最頻値を用いた場合には、高透水性の亀裂が評価結果に及ぼす影響を考慮することができず、また、岩盤の透水係数を拘束条件とした場合には、亀裂密度を高

く設定するほど個々の亀裂の透水性が低くなることから、亀裂密度の観点で保守的に高い亀裂密度を設定することが、必ずしも保守的な評価結果を導くとは限らない。そこで第2次取りまとめでは、具体的な処分場のレイアウトを考慮せずに処分場の下流側の100m程度の規模の岩盤を母岩と設定し、母岩中の核種移行経路を簡略かつ保守的に表現するために複数の経路をそれぞれ均質な一次元平行平板モデルでモデル化してそれらを重ね合わせた手法が採用された。その際、母岩の不均質な透水性は透水量係数の確率分布によって表現された。透水性割れ目の透水量係数は、ボーリング調査の透水試験のデータに基づき設定される。理想的には、ボーリング調査によって抽出される断層や割れ目の個々の透水量係数が透水試験によって計測され、評価対象の母岩に対してボーリングの数を増やし、透水性割れ目の透水量係数分布の不確実性を低減していくことが望ましい。しかしながら、一つのボーリング孔において、移行経路になり得る割れ目が十数条程度であれば、個々の割れ目の透水量係数を計測するような調査プログラムとすることは可能かもしれないが、実際には、数100mの長さのボーリング孔においてそのようなケースは稀であり、調査の目的やコスト、調査期間の理由から個々の割れ目の透水量係数を計測するような試験を行うことは難しい。超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）における深層ボーリング調査の経験に基づくと、以下に示す5つの視点で割れ目の透水量係数分布の算出方法が設定される。

- ・ ボーリング孔全体の透水性を把握するための長区間の透水試験の有無
- ・ 透水性割れ目近傍の透水性を把握するための短区間の透水試験の有無
- ・ 電気伝導度検層により検出した流入点のデータの有無
- ・ 電気伝導度検層により検出した流入点に対応する割れ目の解釈
- ・ 透水性との関連付けた割れ目の類型化に関する知見

結晶質岩のような亀裂性岩盤においては割れ目が主要な地下水の経路となることから、水理地質構造のモデル化や地下水流動解析などに反映する上で、主要な地下水の流動経路となる水みちの位置（ボーリング孔への流入点）を把握することが重要である。一般的に水みちを検出する調査手法としてフローメータ

一検層が用いられる。超深地層研究所計画における深層ボーリング調査では、高解像度で水みちを把握する手法である電気伝導度検層を採用することにより、フローメーター検層では検出することができなかったより低透水性の地下水の流入点を、より高い解像度で検出することが可能となった（竹内ほか 2003；Takeuchi *et al.*, 2004；竹内ほか, 2004；三枝ほか, 2007）。電気伝導度検層は孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水（脱イオン水や塩水など）で置換し、その後、揚水をしながら孔沿いの電気伝導度を計測することにより、電気伝導度の有意な変化が認められる水みちの位置を検出する手法である（Tsang *et al.*, 1990）。さらに、流入点の電気伝導度の分布を数値解析によって再現することにより、流入点の透水量係数を算出することができる（Doughty *et al.*, 2005；松岡ほか, 2007；Takeuchi *et al.*, 2008）。しかしながら、電気伝導度検層により検出可能な透水性割れ目の透水量係数の下限値は、 10^{-8} m²/s 程度であることが分かっており（竹内・藤田, 2005）、電気伝導度検層のデータだけでは、低透水性側も透水量係数分布の不確実性を低減することはできない。また、透水試験の区間内に複数の割れ目が分布する場合はほとんどであり、電気伝導度検層によって流入点の位置を絞り込んでいたとしても、その範囲は±1.0 m とされている。透水試験が対象としている範囲に位置する割れ目のうち、どれを透水性割れ目として扱うのかという判断は、個々の透水量係数の算出に大きく影響する。すなわち、「透水性との関連付けた割れ目の類型化に関する知見」は重要である。この透水性との関連付けた割れ目の類型化は、ボーリング孔のコア観察、地表踏査や地質観察から取得できるような断層や割れ目の記載学的な特徴（形状、割れ目面の産状、充填鉱物の種類、断層岩の有無と特徴、湧水状況など）に基づき行われるが、割れ目の類型化を最も確実だと思われる指標によって実施するためには、対象としている岩盤が分布する地域における割れ目サイズに関する特徴（フラクタル特性など）や構造発達史に関する知見、など可能な限り取り入れることができる知見やデータを踏まえて総合的に水みちないし移行経路に関する概念化されていることが前提条件となる。

(2) 3次元モデルを用いた場合

実際の地質環境を可能な限り再現する核種移行解析では、処分場を含む領域を通過する地下水の涵養域から流出域までの比較的大きなスケールを対象とし

た地下水流動解析に基づく，より現実的な地下水移行経路の設定や，地下水流動特性や物質移行特性などの評価が必要となる。これらは，3次元の水理地質構造モデルを構築し，それに基づく解析により評価される。3次元の水理地質構造モデルを用いた解析に関する評価ツリーを図 4.4.2-3 に示す。

水理地質構造モデルについては，データ量や評価領域のスケールが場合分けの条件となり，その状況に応じて適切な水理地質構造モデルを選択する必要がある。一般に，岩盤の地下水流動解析に用いる水理地質構造モデルは，岩盤を多孔質の連続的な媒体と仮定した「多孔質媒体モデル (Continuum Porous Media Model: CPM モデル)」と，割れ目などの不連続構造を取り出した「個別亀裂ネットワークモデル (Discrete Fracture Network Model: DFN モデル)」である。このほかに，岩盤中の不均質性を考慮するために，ある一定のスケール毎あるいは地質構造区分毎に等価な多孔質媒体モデルと置き換えてモデル化する「等価不均質多孔質媒体モデル (Equivalent Continuum Porous Model: ECPM モデル)」が用いられるが，これは DFN モデルに基づいている。

図 4.3.2-4 に，CPM モデルの構築に関する評価ツリーを示す。割れ目や透水係数の分布に関する情報が少なく，DFN モデルを構築することが適切でない場合や，解析領域が広く DFN モデルを用いた解析モデルの計算量や解析時間が膨大になり実用的な範囲で解析を実施することが困難な場合，結晶質岩のように水理特性の観点で亀裂性媒体として扱われる岩盤であっても，CPM モデルが適用されることはよくある。CPM モデルを構築し，地下水流動解析および粒子追跡法による解析を行うためには，地質構造モデル，地質構造別の透水係数，水理学的有効間隙率を必要とする（例えば，尾上ほか，2005；牧野ほか，2005）。地質構造モデルの構築では，物理探査，地表踏査およびボーリング調査などの地表からの一連の調査によって取得されるデータから岩盤の地質学的特徴が整理され，地層や岩体，断層などの 3 次元分布がモデル化される。透水係数の設定では，地質構造モデルにおいて示される断層や地層・岩体の地質構造区分を考慮して設定される水理地質構造区分毎に透水係数の代表値が与えられる。その透水係数は，主に単孔式透水試験データに基づく。亀裂性媒体における水理学的有効間隙率は主要な水みちとなる透水性割れ目の分布から求められ，その平均間隔と開口幅を用いて推定することができる（澤田ほか，2007）。平均間隔

は、坑壁画像検層のデータから求められる。地質構造モデルは、地表からの調査によって取得された地質データから構築することが可能であり、坑道掘削時の壁面観察において取得される地質データに基づき更新される。後述の 4.5.1 節では、壁面観察によって取得される地質データに基づく地質構造モデルの更新の事例を示す。

図 4.4.2-5 に、DFN モデルの構築に関する評価ツリーを示す。DFN モデルは、花崗岩などの亀裂性岩盤を対象として、地下水流動や物質移行の経路になり得る個々の割れ目や断層といった水理地質構造を数値的に表現したモデルである (Dershowitz, 1985)。具体的には、割れ目や断層を円盤状の平行平板で表現し、その空間分布、形状、水理特性などを確率論的にモデル化し、割れ目の連結によって形成されるネットワーク状の移行経路を表現したモデルである。DFN モデルは連続体モデルに比べ、割れ目データを直接モデルに反映することができ、割れ目が地下水流動に与える影響を評価できるという利点がある。そのため、処分坑道から 10~100m 程度の領域を評価する際に有効なモデル化手法である (重野・宮川, 1995 ; JNC, 1999b ; 澤田ほか, 1999)。この領域は、坑道掘削時の壁面観察や坑道内でのボーリング調査によって個々の割れ目の分布特性や水理特性に関する調査データの量が増大すると期待される領域である。DFN モデルの構築およびそれを用いた解析には、透水性割れ目の幾何学的特性、割れ目の類型分けの情報および割れ目の透水量係数分布などの情報が必要となる。DFN モデルの構築に用いる透水性割れ目の幾何学的特徴は、割れ目の方向分布、形状、半径分布、割れ目密度、割れ目の空間分布、割れ目の幅である。これらの割れ目特性の推定には、大規模トレンチ調査、リニアメント判読の調査により得られる割れ目のトレース長や、坑壁画像検層により取得される割れ目の方向分布や割れ目密度などを用いるが、それぞれのデータセットに対してモデル構築上の仮定や経験式などを用いる必要がある。割れ目の透水量係数分布の設定については、(1) で述べたとおりである。割れ目の類型分けに関する情報は、DFN のモデル化に必須となる情報ではないが、調査の進展に伴い割れ目の類型と透水性の関係を合理的に説明可能なモデルにする必要がある。調査の初期段階では、透水性割れ目の設定に複数の解釈を与えられるため、評価結果の不確実性が大きい。後述の 4.5.2 節に、この事例を示す。

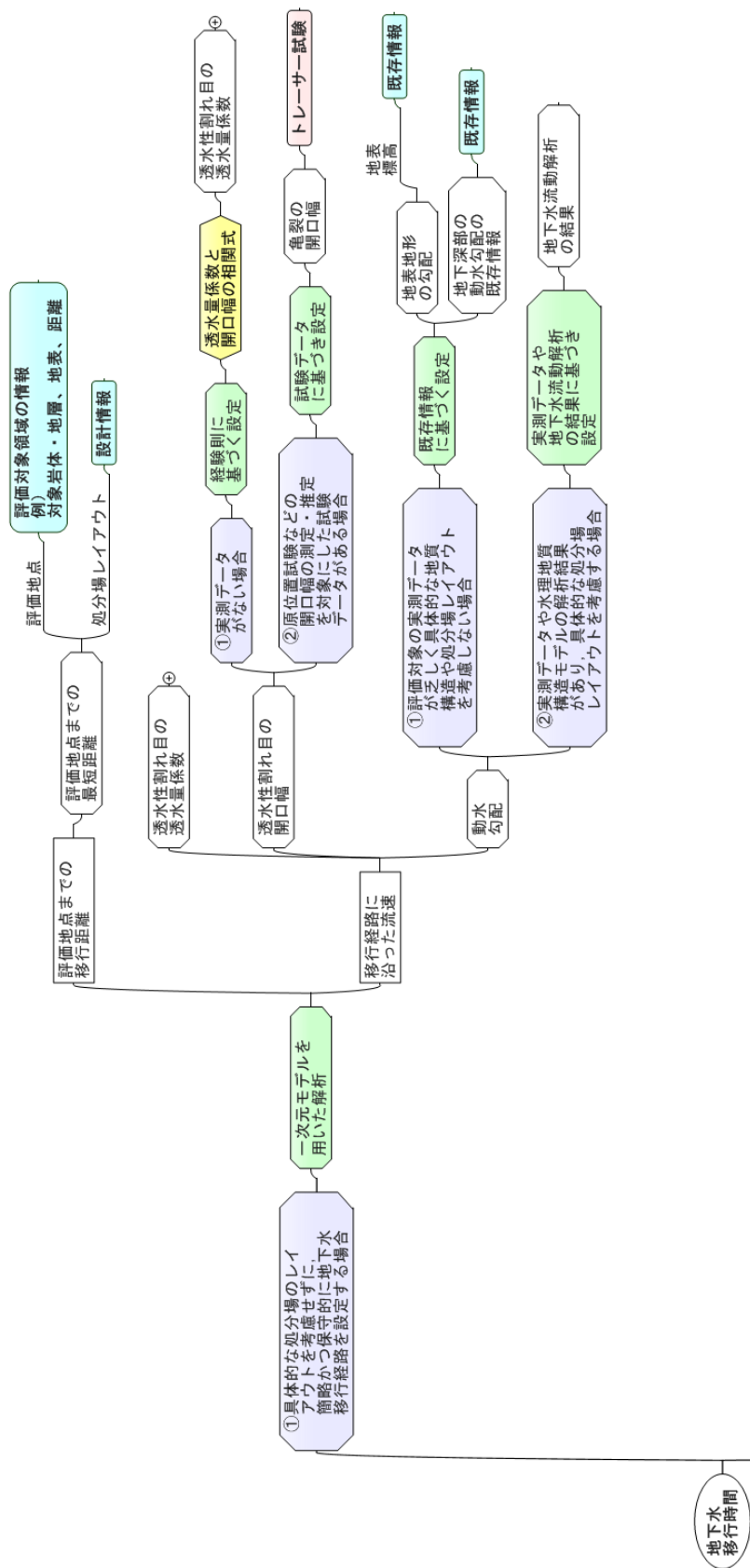


図 4.4.2-2 地下水移行時間に関する評価ツリー
(一次元モデルを用いた解析の場合、透水性割れ目の透水量係数および水理地質構造モデルの詳細な評価ツリーを除く)

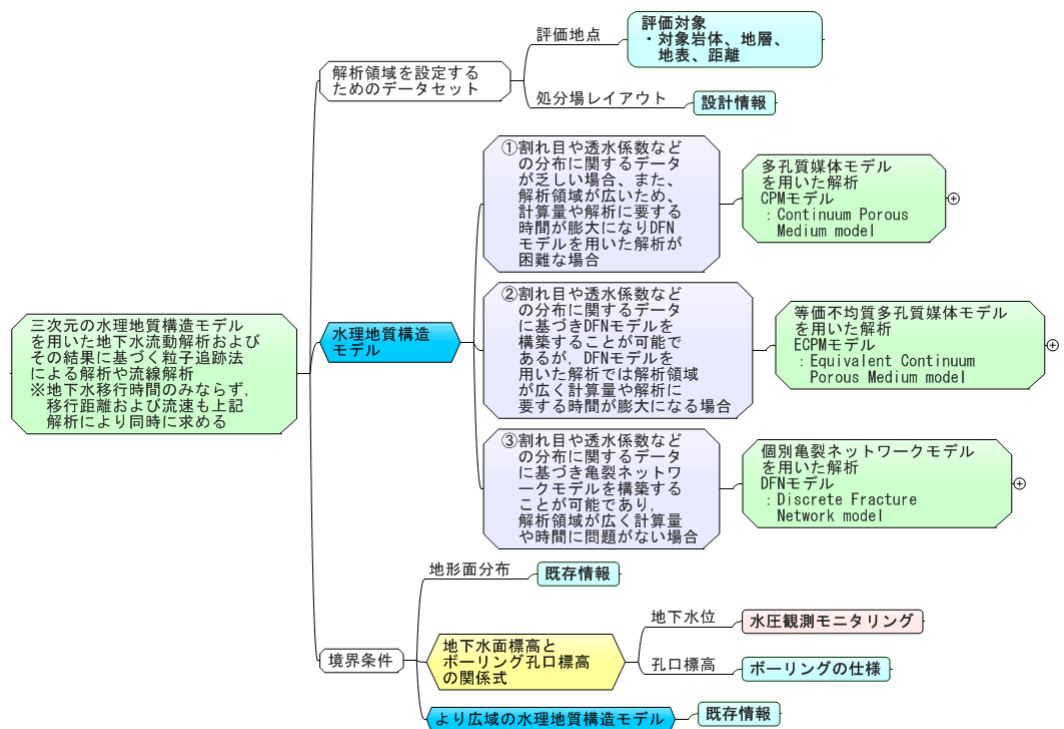


図 4.4.2-4 3次元水理地質構造モデルを用いた解析に関する評価ツリー

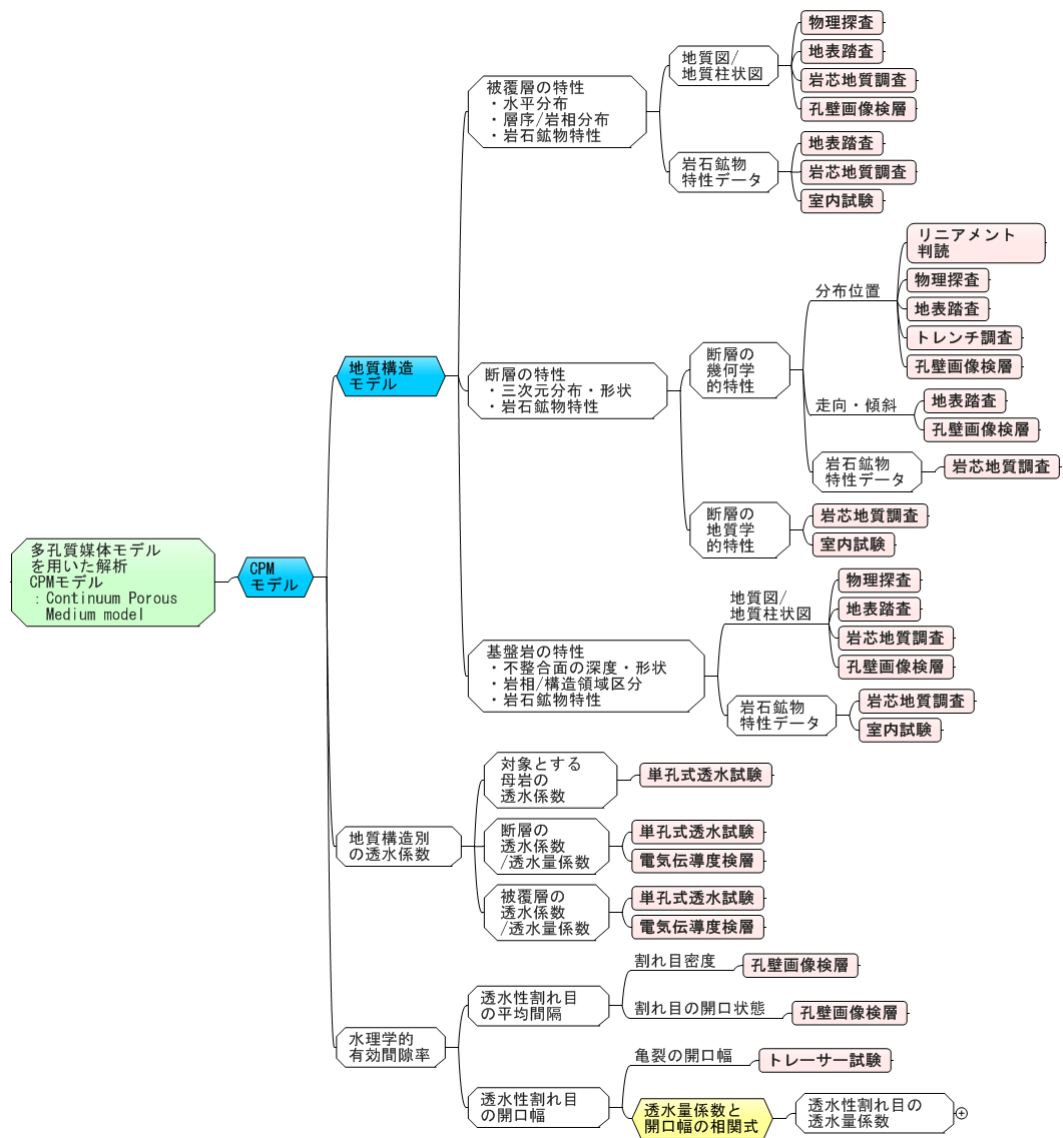


図 4.4.2-5 多孔質媒体モデル（CPMモデル）に関する評価ツリー

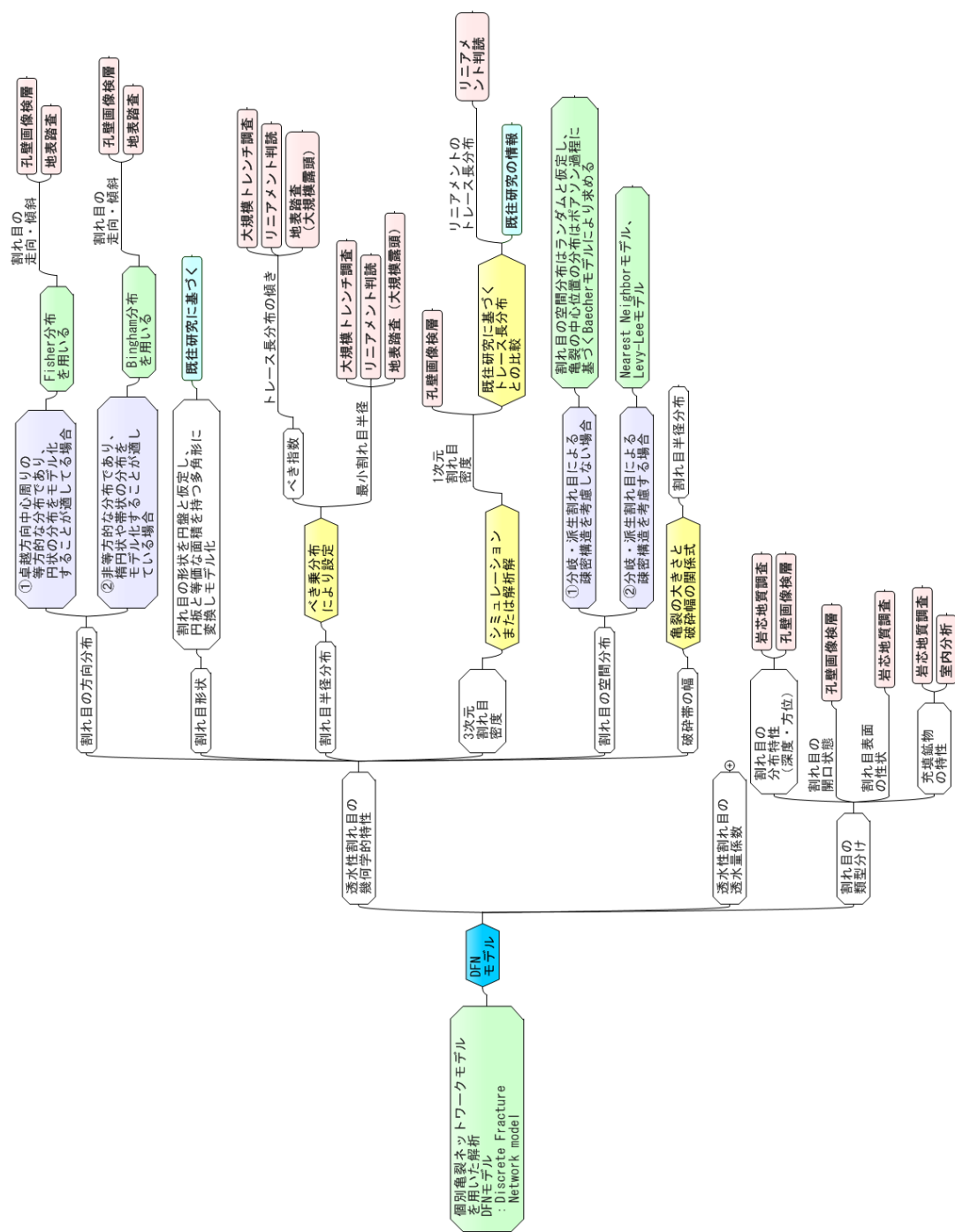


図 4.4.2-6 個別亀裂ネットワークモデル (DFN モデル) に関する評価ツリー

4.5 地下水移行時間の評価と壁面観察の関係とその重要性

4.5.1 事例 1：新第三紀塊状珪質泥岩に分布する層理面に平行な断層とそれに斜交する断層の交差関係

(1) 幌延深地層研究センターの地質概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を目的として建設されている幌延深地層研究センター（以下、「幌延 URL」）（例えば、岩月ほか，2011）周辺には，新第三紀から第四紀の堆積岩が分布しており，これらは下位から稚内層，声問層，勇知層，更別層に区分されている（図 4.5.1-1）。これらの地層のうち，幌延 URL は，稚内層と声問層の二つの地層に展開されている。下位の稚内層は，弱い層理面の発達を伴う（石井ほか，2006）塊状かつ均質な珪質泥岩（Iijima and Tada, 1981）から構成される。下位の声問層は，主に珪藻質泥岩から構成される。珪質泥岩と珪藻質泥岩は，ともに珪質岩に珪質岩として分類される。珪質泥岩は，珪藻質泥岩中のオパール A（非晶質な含水シリカ鉱物：珪藻遺骸）が埋没続成作用によりオパール CT（結晶度の低い含水シリカ鉱物）化して形成されたものである（Fukusawa, 1985）。そのため，本研究の対象である稚内層を構成する珪質泥岩は，声問層を構成する珪藻質泥岩と比べて硬質であり，水理学的には亀裂性媒体としての性質が強い（舟木ほか，2009；Ishii, E. *et al.*, 2011）。幌延 URL は背斜構造の西翼部に位置し，層理面の走向はおおよそ N50° W で，30° から 40° 程度の傾斜である。稚内層中には，幌延 URL の北東側に分布するマップブルな規模の大曲断層以外に，露頭スケールの小規模な断層が，これまでの露頭調査やボーリング調査によって認められている。それらは，層理面に平行な縦ずれ優勢の断層（層面断層）と層理面に交差する横ずれ優勢の断層（交差断層）に分類される（石井・福島，2006；Ishii *et al.*, 2010）。それらの切断関係は，地表の露頭観察によって，交差断層が層面断層を切ることが確認されたことから，交差断層が層面断層より新しいとされている（石井・福島，2006；Ishii *et al.*, 2010, 2011；Ishii, 2012）。

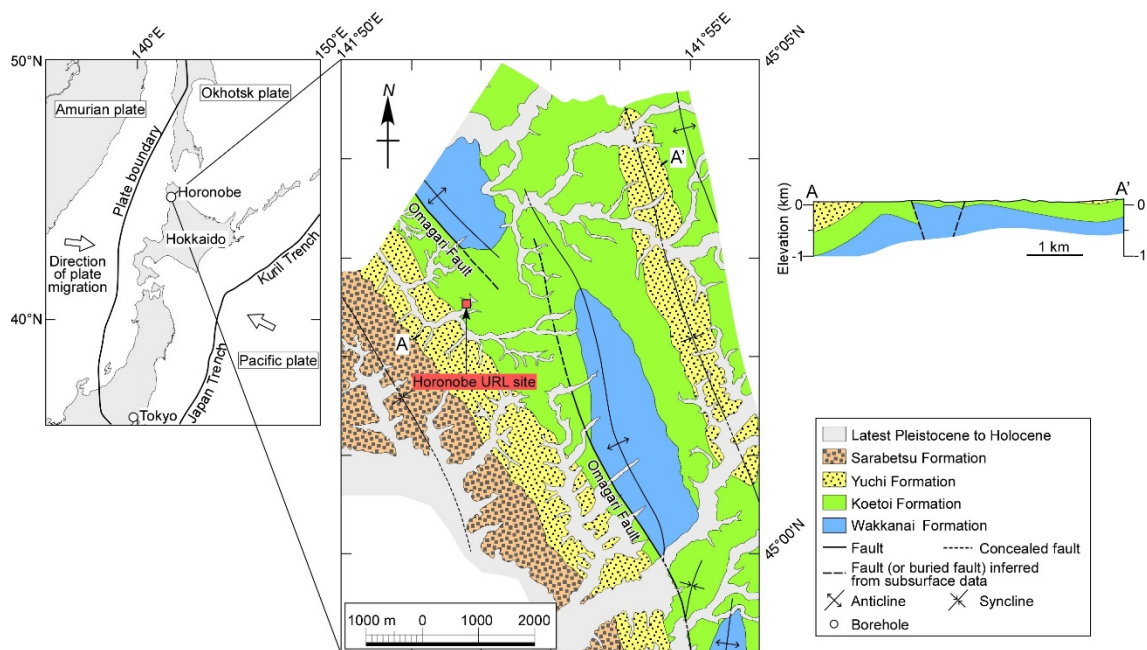


図 4.5.1-1 幌延地域の地質図と NE-SW 方向の地質断面図（石井ほか，2008 を改変），プレート境界とプレートの動きの方向（左の地図）は Wei and Seno, 1998 に基づく。

（2）地上からのボーリング調査によって確認された断層分布と特徴

幌延 URL の坑道掘削に先立ち，換気立坑から NNE 側に約 20m 離れた位置において掘削長 520m の先行ボーリング孔（PB-V01）と，東立坑から NW 側に約 30m 離れた位置において掘削長 512.8m の先行ボーリング孔（SAB-1）が掘削された（図 4.5.1-2）。背斜構造の西翼部に位置する幌延 URL では，稚内層と声問層の境界面が南西方向に傾斜するため，場所によって地層境界の出現深度が異なる。声問層と稚内層の境界は，PB-V01 孔では深度 236.5m（舟木ほか，2008），SAB-1 孔では深度 240m（須甲ほか，2013）であることが確認されている（図 4.5.1-2a）。PB-V01 および SAB-1 では，地層境界面から鉛直下向きに約 20m，約 50m，約 130m，約 160m 離れた位置に層面断層が確認された（図 4.5.1-2a）。ここでは，上位の層面断層から順に MM 断層，LastMM 断層，S1 断層，S2 断層と呼ぶ。それらは，幅 1-2 cm 程度の断層ガウジを主体とする断層岩を伴う（図 4.5.1-2c）。一方，交差断層に伴う断層岩は，たいてい断層角礫を主体とし，層面断層とは特徴が異なる（図 4.5.1-2b）。ボーリング孔の観察結果だけでは，層面断層の広がりや 2 つのタイプの断層の交差関係を判断することは難しい。

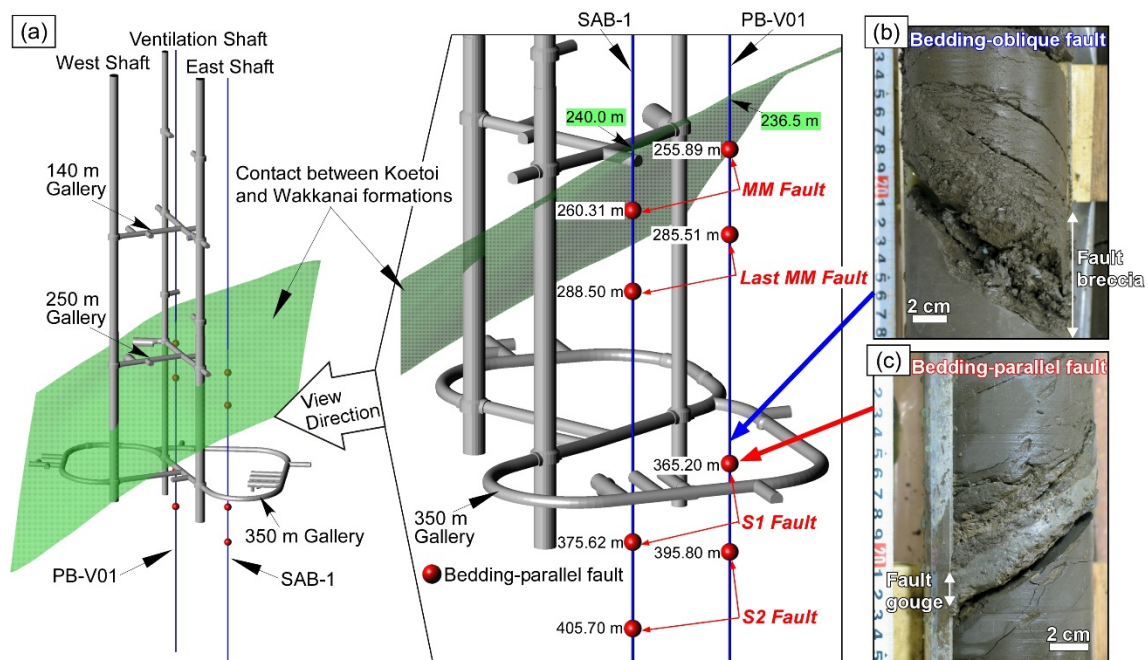


図 4.5.1-2 幌延 URL のレイアウトと断層の写真

(a)幌延 URL のレイアウトと声問層と稚内層の地層境界、赤い球は SAB-1 と PB-V01 において層面断層が観察された深度を示す。(b) PB-V01 の深度 363.17 m において観察された斜交断層の断層岩、(c) PB-V01 の深度 365.20 m において観察された層面断層の断層岩

(3) 壁面観察によって確認された断層分布と特徴

幌延 URL では、換気立坑（深度 380m）、東立坑（深度 380m）、西立坑（深度 365m）の 3 つの立坑と、深度 140m、250m、350m に水平坑道群が掘削された（図 4.5.1-2a）。深度 350m の水平坑道が最も広く展開されており、総延長約 760m である。壁面観察は、西立坑を除いたすべての坑道で実施された。前述のとおり地層境界の出現深度が異なり、声問層と稚内層の境界は、換気立坑では深度 247m（中山ほか，2009），東立坑では深度 261m（中山ほか，2012）であることが確認されており、深度 350m 調査坑道全域は稚内層中に掘削された。図 4.4.2-3a, b に、壁面観察によって確認された断層分布として、立坑の展開図および 350m 水平断面図を示した。坑道壁面には断層以外に断層岩を伴わない割れ目も多数分布するが、この図には、断層に連続する割れ目あるいは一定のトレース長を有する割れ目のみ示した。

換気立坑の壁面観察によって確認された層面断層は、MM 断層、LastMM 断層および S1 断層、東立坑では、MM 断層および LastMM 断層である（図 4.5.1-

3a)。また、350m 水平坑道の壁面観察では、LastMM 断層および S1 断層が観察された (図 4.5.1-3b)。坑道内の壁面観察において確認された層面断層には、視認できる程度の明瞭な断層ガウジを連続的に伴う (図 4.5.1-4)。MM 断層と S1 断層の断層ガウジの幅は、坑道壁面にほとんどの箇所では 3-5 cm 程度であり、局所的には最大 400 mm 程度であった。LastMM 断層は、ほとんどの箇所において 1-3 cm 程度で局所的には最大 20 cm 程度と MM 断層と S1 断層と比較して薄い傾向であるが、ほとんどの箇所では明瞭な断層ガウジが認められる。MM 断層、LastMM 断層、S1 断層および S2 断層は、それぞれの層面断層の位置と方向に基づき、層面断層の位置を図 4.5.1-3b の B-B' 線を通過する鉛直断面に投影された (図 4.5.1-5)。その結果、4 つの層面断層はそれぞれの位置と方向性の観点から対比可能であることが確認できた (図 4.5.1-5)。MM 断層は 350 m 調査坑道と交差しないが、試験坑道 5 から掘削された 2 本のボーリング孔において確認された層面断層と同様の対比が可能である (図 4.5.1-3b, 図 4.5.1-5)。また、S2 断層は、坑道壁面には出現しない (図 4.5.1-5)。以上のことから、ボーリング孔において確認された 1-2 cm 程度の幅の視認可能な断層ガウジを伴う層面断層は、少なくとも数十 m の広がりを持って分布していると考えられる。

一方、交差断層もまた壁面観察において確認されており、その断層岩は、たいてい断層角礫を主体とし、層面断層に伴う断層ガウジとは特徴が異なる (図 4.5.1-2b)。西周回坑道から試験坑道 5 にかけて少なくとも 40m 程度のトレース長を有する NNE 走向 30° 西傾斜の交差断層が確認された (図 4.5.1-3b, 図 4.5.1-3d)。この交差断層は坑道壁面の壁面観察の範囲において最も長いトレース長である。しかしながら、坑道壁面の壁面観察結果のみから交差断層の大きさを推定することは難しい。

層面断層と交差断層の交差関係は、主に 3 か所で確認された。350m 調査坑道の西周回坑道では、LastMM 断層が交差断層に切られていることが確認された (図 4.5.1-3d)。これは、地表の露頭観察の結果から、交差断層が層面断層より新しいという解釈(石井・福島, 2006; Ishii *et al.*, 2010)と整合的である。一方、MM 断層や S1 断層は、交差断層に切られている箇所は認められず、むしろ、交差断層が MM 断層や S1 断層の近傍での終結が確認された (図 4.5.1-3c,

図 4.5.1-3e)。MM 断層や S1 断層の近傍において、交差断層の進展が終結していたことから、先に存在し、一定の大きさを持った層面断層は、後に形成される交差断層の進展を規制するようなメカニカルバリアとして機能していた可能性があると考えられる。一方、LastMM 断層は交差断層に切られていた事実を、LastMM 断層の断層面の結合の程度が相対的に強かったと考えられ、LastMM 断層の断層ガウジの幅が、MM 断層や S1 断層の断層ガウジの幅より薄い事実と矛盾しない。すなわち、MM 断層や S1 断層は、LastMM 断層と比較して交差断層の進展に与える影響の度合いが大きかったと考えられる。

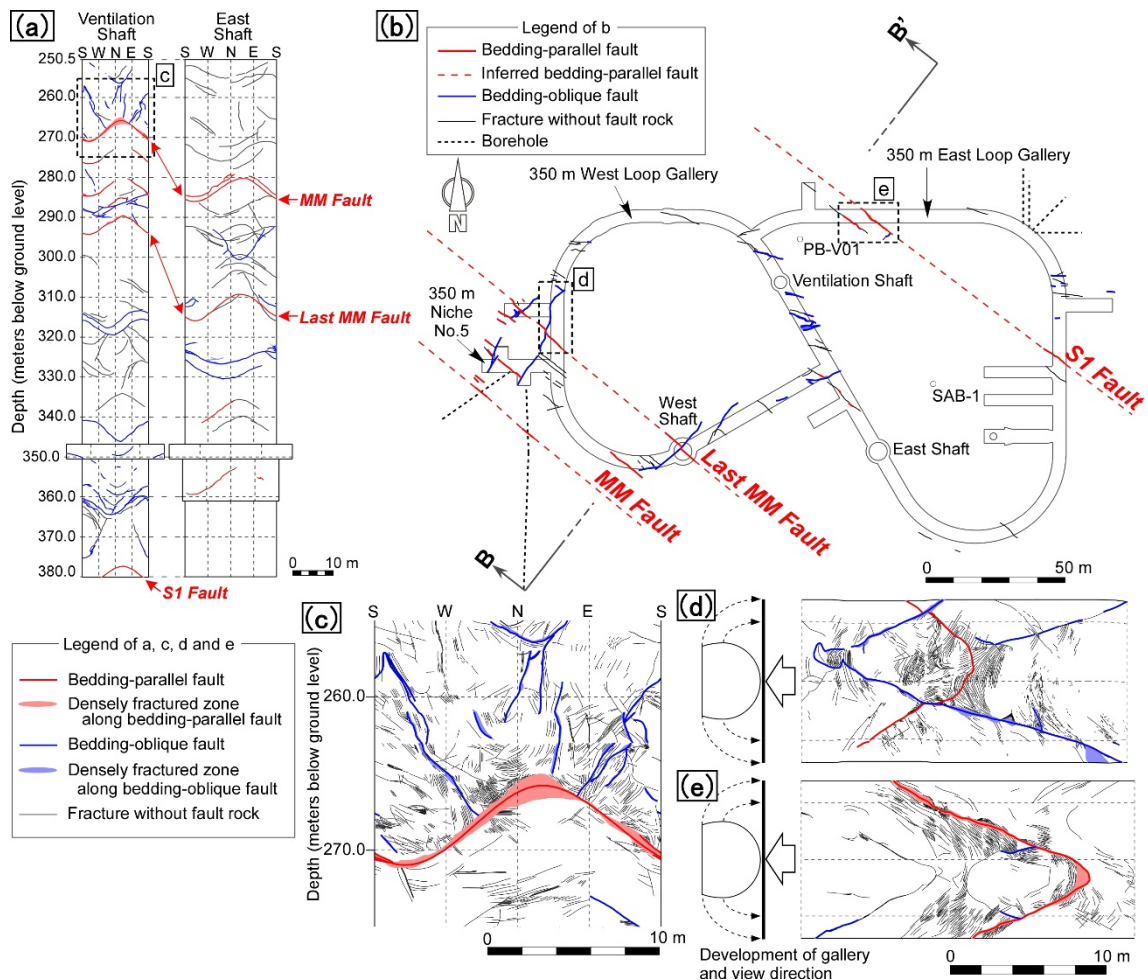


図 4.5.1-3 幌延 URL において観察された割れ目の分布
(a) 幌延 URL の換気立坑と東立坑の壁面における割れ目の分布, (b) 幌延 URL の 350m 調査坑道 における割れ目の分布, (c)換気立坑の深度 255 から 275 m までの割れ目分布を示した立坑展開図, (d)350m 西周回坑道の一部の割れ目分布を示した坑道展開図, (e) 350m 東周回坑道の一部の割れ目分布を示した坑道展開図

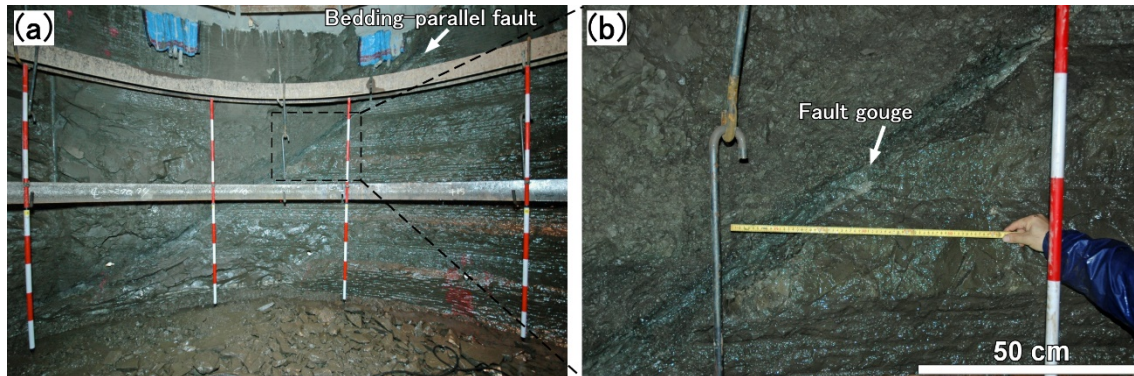


図 4.5.1-4 幌延 URL の換気立坑において観察された層面断層
(a)換気立坑の深度 269.0 から 270.8 m の坑道壁面において観察された MM 断層, (b)視認できる断層ガウジ (断層部分の拡大写真)

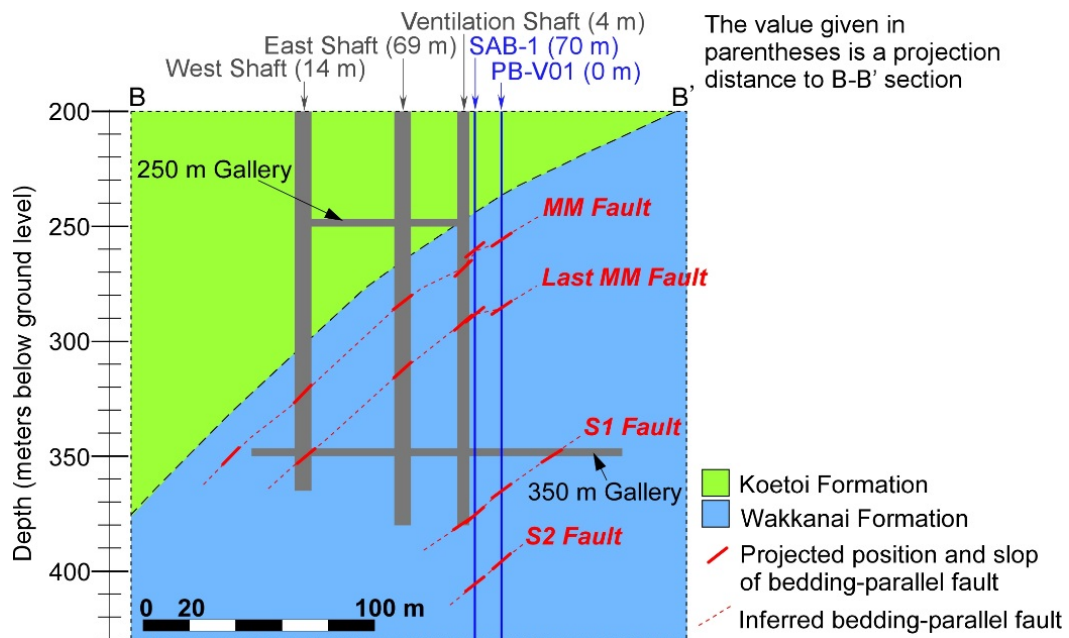


図 4.5.1-5 層面断層の分布を示した鉛直断面図(図 4.5.1-3b の B-B' 断面線)

(4) 壁面観察による断層分布の理解度の進展

新第三紀の塊状珪質泥岩からなる稚内層に分布する層面断層と交差断層の分布や特徴に関する理解度は、幌延 URL の立坑掘削に先行して行われたボーリング調査から、その後の立坑および水平坑道の掘削時に行われた坑道壁面の壁面観察にかけて進展した。ボーリング調査では、稚内層における層面断層と交差断層の位置 (深度) とそれぞれの断層岩の特徴の違いを明らかにすることができた。そして、その後の壁面観察の実施により、断層の連続性、交差関係や

断層岩のより詳細な特長を明らかにすることができ、その結果、以下に示す知見を得ることができた。

- ・ 幅数mmから数cm程度の明瞭な断層ガウジを伴う層面断層は、すくなくとも数十メートルの広がりを持って分布している。
- ・ LastMM断層が交差断層に切られていたことは、層面断層が形成された後に交差断層が形成されたという既往研究からの知見に矛盾しない。
- ・ MM断層およびS1断層の近傍で交差断層が終結していたことから、層面断層が後から形成される交差断層の進展を規制するようなメカニカルバリアとして機能していた可能性が考えられ、特に、MM断層やS1断層のような厚い断層ガウジ（粘土）を伴う層面断層は、交差断層の進展に与える影響が大きかったと考えられる。

これらの知見は、層面断層と交差断層の広がりや先に存在した層面断層が後に形成される交差断層の進展を規制している可能性に関することであり、地質構造モデルを構築する際に役立つ。よって、壁面観察の実施は重要といえる。

4.5.2 事例2：ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法

(1) 背景

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的信頼性を示した「第2次取りまとめ」では、安定な地質環境を選定したうえで人工バリアの性能に余裕を持たせた多重バリアシステムを構築することによって、人工バリアとその近傍の比較的狭い領域の岩盤からなるニアフィールドが有する性能に力点をおいた処分概念が示された（JNC,1999）。そして、「第2次取りまとめ」におけるリファレンスケースの評価結果では、処分坑道周辺の数十メートル程度のニアフィールド岩盤の範囲で有意な核種移行遅延性能を有する可能性が示された（図 4.5.2-1）。また、処分坑道周辺のニアフィールド岩盤を対象とした水理・物質移行特性に関する情報は、地上からの調査といった調査の初期の段階では限定されるものの、坑道掘削時あるいは地下坑道などを活用した調査の段階ではより詳細なデータが取得されることができる。そのため、ニアフィール

ド岩盤では、天然バリアの中でも主要な遅延性能が期待される領域になるだけでなく、調査の進展に伴い核種の移行経路となる透水性構造の不均質な分布に関する情報が新たに取得されることによって、評価モデルやパラメータ値の信頼性の向上が期待される領域である。

地層処分事業において、概要調査から精密調査に移行する際の精密調査地区の選定といった次段階調査の候補となる母岩を判断する場合には、地質環境調査・モデル構築、地下施設の設計、シナリオ評価、天然現象影響評価、生物圏評価などを踏まえた処分システムの安全性に関する総合的な解析・評価の結果に基づくものと考えられる。この総合的な安全評価では、各分野の評価上の前提条件や評価の対象となる項目が相互に関連することから（図 4.5.2-2）、これらの相互間の調整には時間を要するだろう。一方、調査の初期の段階から安全確保にかかわる目標を達成できる岩盤か否かを見通しながら事業を進めるためには、母岩の選定や地下施設の設計などの検討の過程において調査と性能評価の効率的な連携が不可欠である。その際、調査の進展に伴い調査データが詳細になると期待できるニアフィールド岩盤に着目し、任意の領域毎あるいは地質構造毎に核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価し、それを相対比較できる評価手法が有効であると考えられる。

そこで、ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価するための手法を検討し、超深地層研究所計画（JAEA,2010）における地表からの調査段階において取得された調査データを用いて評価を試みた。本研究での核種移行解析で考慮する核種については、安全評価の対象核種の全てを考慮する必要はなく、生物圏における線量評価において支配的になる可能性のある核種を対象にすることが効率的かつ効果的である。そのため、第2次取りまとめの安全評価から得られた知見に基づき、Cs-135とNp-237のふたつの核種を対象とすることとした。第2次取りまとめのリファレンスケースにおける母岩からの核種移行率の線量への換算結果では、処分後の約2万年から約200万年まではCs-135が支配的となり、その後はNp-237を親核種として、それとほぼ放射平衡の関係にあると考えられるTh-229が支配的になっている（JNC,1999）。

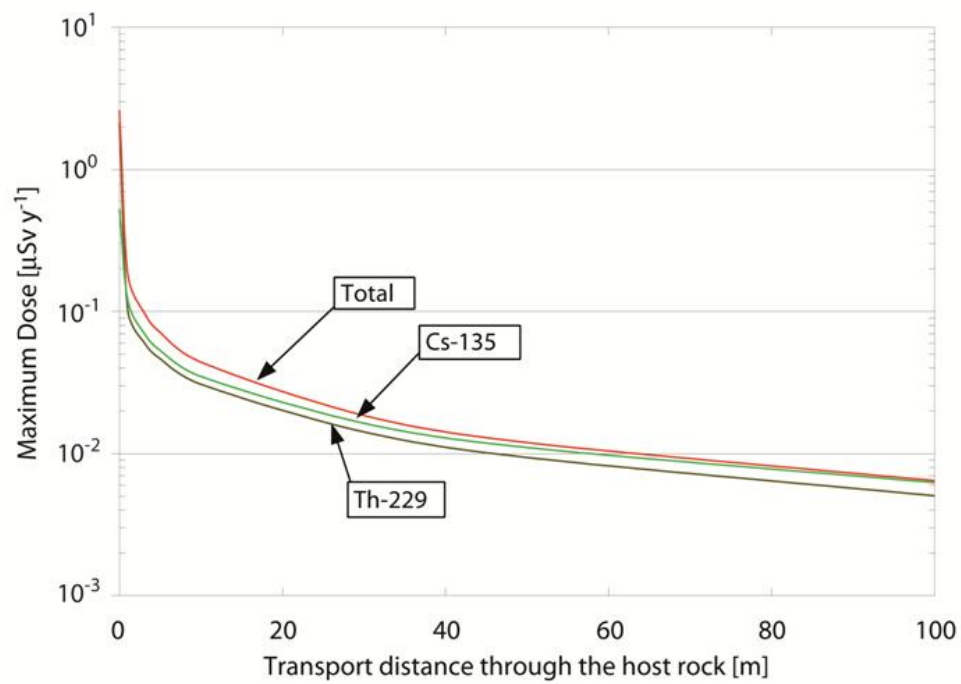


図 4.5.2-1 最大線量の移行距離に対する変化（JNC, 1999 に基づく）

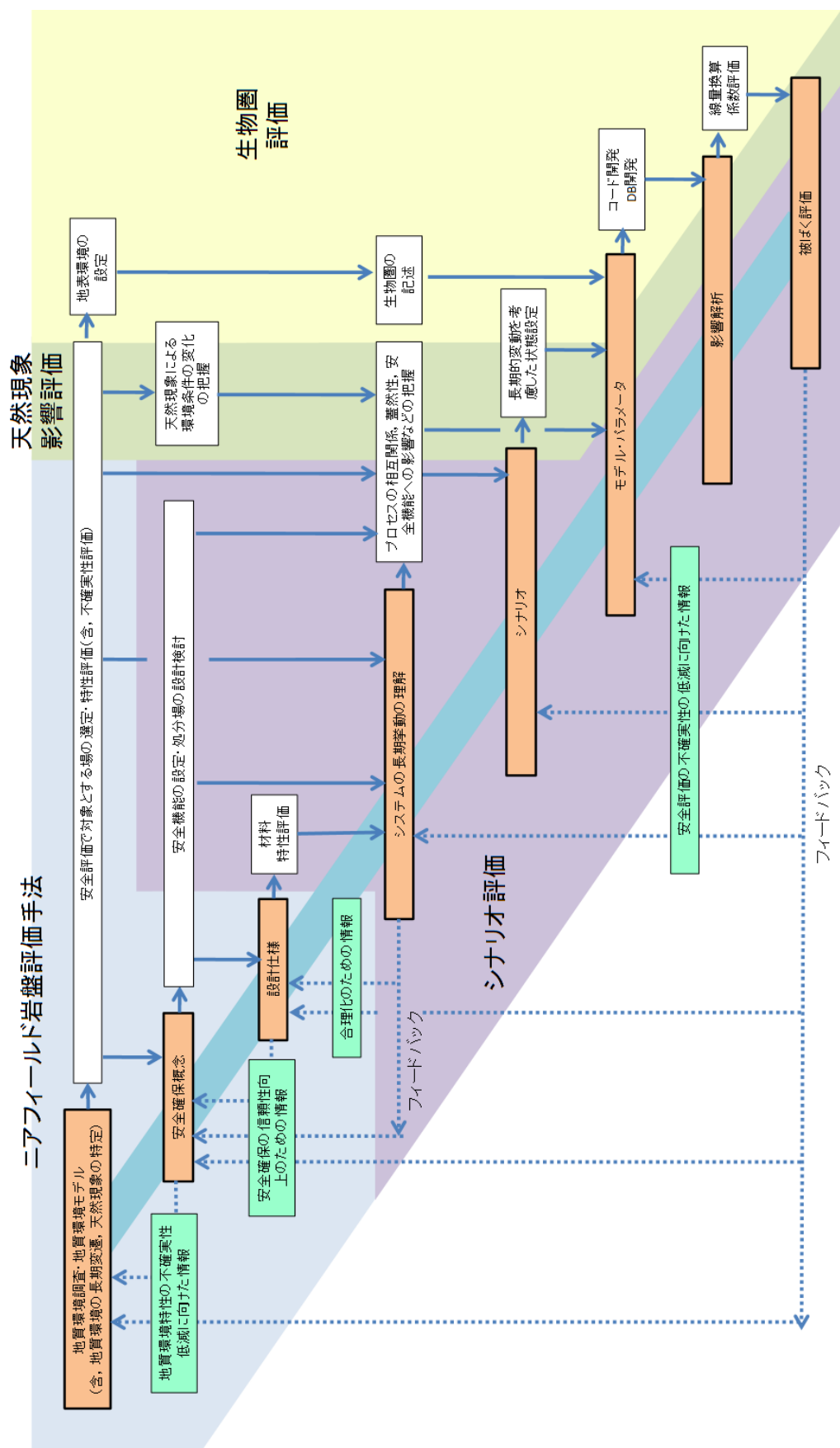


図 4.5.2-2 総合性能評価の枠組みと個別研究テーマの関係
(第 6 回 地層処分研究開発検討委員会, 資料 22-2
<http://www.iaea.go.jp/04/tisou/iinkai/iinkai/6-2.pdf>)

(2) 評価手法

本検討で設定される評価手法は、ニアフィールド岩盤を対象とした簡便かつ定量的に核種移行遅延性能を評価する手法である。そのため、各設定は保守的（安全側）に行われる。評価対象領域の設定では、具体的なレイアウトを想定せずに任意の 100m 程度の領域を仮定し、核種移行概念の設定では、第 2 次取りまとめ（JNC,1999）の方法論に準拠して、核種は崩壊を伴いながら亀裂中を移流、分散により移行するとともに、亀裂表面からのマトリクス部への拡散と収着により遅延されることを仮定した。第 2 次取りまとめでは、天然バリア中の核種移行モデルとして、亀裂の透水量係数の不均質性に着目し、透水量係数の異なる複数の一次元平行平板モデル（図 4.4.1.-3）を重ね合わせたモデルを適用した（JNC,1999）。処分坑道から（任意の点から仮想的に）下流側に向かって 100m の厚さの岩盤中を核種が移行し、評価対象領域のすべての透水性割れ目がそれぞれ独立した移行経路であると仮定したモデルを採用した。全ての移行経路の距離は最短の 100m とした。一次元平行平板モデルに基づく解析では、人工バリアからの核種の一定流入率 ϕ_{in} と、亀裂中の任意の地点における定常状態での核種移行率 ϕ_{out} の比 ϕ_{out}/ϕ_{in} を求める解析解を用いた。その解析解は式 4.5.2-1～4 で表わされる（石原ほか,1999；澤田ほか, 1999）。

$$\frac{\phi_{out}}{\phi_{in}} = \exp\left(\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe \times \lambda_n \times t}\right) \quad (\text{式 4.5.2-1})$$

$$Pe = \frac{v \times L}{D_L} \quad (\text{式 4.5.2-2})$$

$$t = \frac{L}{v} \times \left[Rf_n + F \times \frac{\varepsilon \times R d_n}{b \times \alpha} \times \tanh(\alpha \times p) \right] \quad (\text{式 4.5.2-3})$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda_n \times R d_n}{D_p^n}} \quad (\text{式 4.5.2-4})$$

Pe : ペクレ数 [-]

λ_n : 核種 n の崩壊定数 [1/s]

t : 核種移行時間 [s]

v : 亀裂内流速 [m/s] = $T \times i / 2b$

T : 亀裂の透水量係数 [m²/s]

i : 動水勾配 [-]

| | |
|---|---|
| L | : 亀裂内の移行距離 [m] |
| D_L | : 亀裂内分散係数 [m^2/s] |
| Rf_n | : 核種 n の亀裂表面への収着による遅延係数 [-] |
| F | : 亀裂単位面積あたりのマトリクス拡散に寄与する亀裂面積の割合 [-] |
| ε | : マトリクス部の空隙率 [-] |
| Rd_n | : 核種 n のマトリクス部内の収着による遅延係数 [-] |
| $(= 1 + \frac{\rho^m Kd_n}{\varepsilon})$ | |
| ρ^m | : マトリクス部の密度 [kg/m^3] |
| Kd_n | : 核種 n の分配係数 [m^3/kg^1] |
| b | : 亀裂開口幅の 1/2 [m] |
| p | : マトリクス拡散深さ [m] |
| D_p^m | : マトリクス空隙中の拡散係数 [m^2/s] |

本検討では、割れ目の透水量係数分布の母集団の全ての透水性割れ目を対象とするため、上記の解析解を用いて、個々の透水性割れ目の $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ を計算し、その値に個々の透水性割れ目の母集団全体に占める割合を乗じた上で、母集団全ての $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ を足し合わせた。

この評価手法は、一定流入率および定常状態を仮定し、崩壊連鎖の効果を扱えないという制約条件があるものの、亀裂中の任意の地点における定常核種移行率に対するパラメータ値の影響特性を簡易的に調べることができる（澤田ほか、1999）。このような簡便な評価手法は、データ量が乏しいと想定される調査初期の段階からニアフィールド岩盤性能の概略的評価を可能にする。加えて、地下施設の概念設計時のレイアウトの検討などにおいて、任意の領域単位あるいは地質構造毎に $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ を求め、それを評価指標にすることにより遅延性能の相対比較を行うことができる。

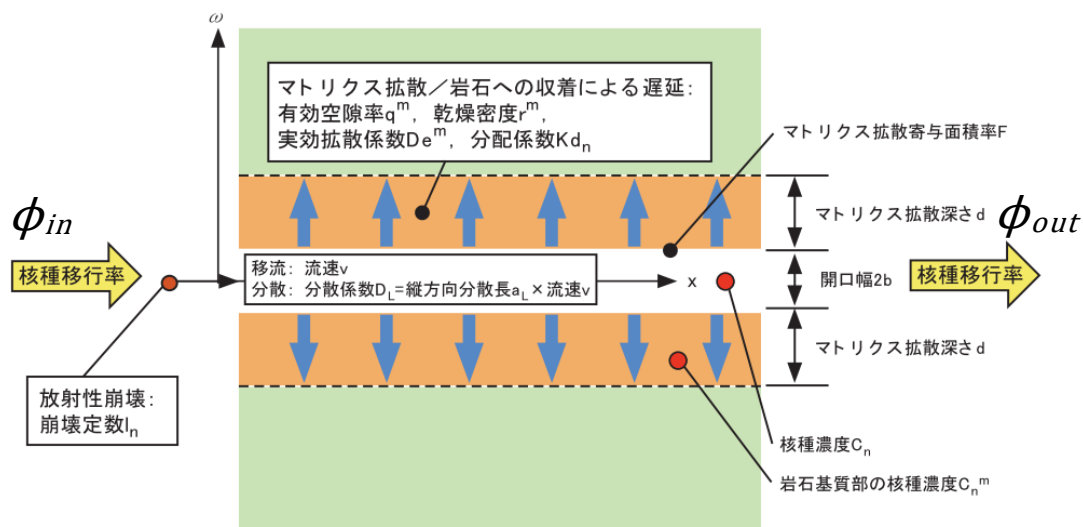


図 4.5.2-3 1次元平行平板モデルの概念図（JNC，1999 に追記）

（3）使用データとパラメータ値の設定

一次元平行平板モデルの重ね合わせは，割れ目の透水量係数分布によって移行経路の不均質性を表現している。「第2次取りまとめ」のレファレンスケースの場合，透水量係数は $10^{-13} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の数桁の範囲にわたって分布し，他のパラメータのばらつきの範囲に比べて核種移行遅延性能に与える影響が大きいことが示されている（澤田ほか,1999）。そのため本検討では，割れ目の透水量係数分布のみ具体的な調査データを用いて設定することとし，その他のパラメータについては，第2次取りまとめのレファレンスケースに準拠して設定した。

割れ目の透水量係数の算出には，超深地層研究所計画（JAEA,2010）の第1段階における調査データのうち，研究用地およびその周辺において実施した一部のボーリング孔を利用した調査により取得したデータを使用した。対象とするボーリング孔は，DH-2号孔（掘削長：501.3m），DH-15号孔（掘削長：1012.0m）およびMIZ-1号孔（掘削長：1300.2m）の3孔とした。調査項目は，孔壁画像検層（以下，「BTV検層」），電気伝導度検層（以下，「FEC検層」）および単孔式水理試験（以下，「水理試験」）を対象とした。それぞれの調査項目に対して割れ目の透水量係数分布の設定に用いたデータおよびその引用先を表4.5.2-1に示す。

割れ目の透水量係数分布を設定する上で透水性割れ目に関する解釈の違いや

個々の割れ目の透水量係数の算出に用いるデータの種類とその組合せの違いから複数の設定を考えることができ、本研究では以下の三つのケースの設定により割れ目の透水量係数分布を設定した。

ケース 1：FEC 検層により検出される流入点（流入点が一つの透水性割れ目）

ケース 2：BTV 検層で検出した「開口割れ目」および「明瞭割れ目」のうち FEC 検層により検出される流入点から±1m の範囲に分布する割れ目

ケース 3：BTV 検層により検出したすべての「開口割れ目」および「明瞭割れ目」

この 3 ケースの透水性割れ目の基準に対して、割れ目の透水量係数の算出方法を表 4.5.2-2 に示す。

ケース 1 については、FEC 検層により検出した流入点の一つの透水性割れ目であると仮定した。そのため、割れ目の透水量係数には、FEC 検層結果に基づく数値解析により求められた流入点の透水量係数をそのまま採用した。

ケース 2 については、FEC 検層により抽出した流入点が複数の透水性割れ目に対応していると仮定し、流入点の位置から±1m の範囲に分布する割れ目を対象に割れ目の透水量係数を算出した。流入点の位置から±1m の範囲に分布する割れ目のうち透水性割れ目として扱う割れ目は、BTV 検層の結果に基づき決定した。BTV 検層では、孔壁画像から亀裂の開口状態を判断し、「開口割れ目」、「明瞭割れ目」および「ヘアークラック」の 3 種類に区分している。このうち、「開口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目として扱うこととした。個々の割れ目の透水量係数の算出にあたっては、流入点の位置から±1m の同一の範囲に分布する「開口割れ目」および「明瞭割れ目」はそれぞれ等しい透水量係数であると仮定して、流入点の透水量係数をその±1m の範囲に分布する「開口割れ目」および「明瞭割れ目」の数で除することにより、割れ目の透水量係数を算出した。

ケース 3 については、FEC 検層では検出できない低透水性の割れ目がボーリング孔全体にわたって分布していると仮定し、水理試験が実施された区間に分布するすべての「開口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目として扱

うこととした。この場合，ケース 1 およびケース 2 が透水量係数データとして FEC 検層の解析結果を用いるのとは異なり，水理試験が実施された区間に分布する割れ目を対象に，その区間の透水量係数を用いて割れ目の透水量係数を算出した。水理試験により得られる結果は，試験区間の区間長に対する透水量係数である。本研究において取り扱う 3 孔のボーリング孔における水理試験には，比較的長い区間の透水性を把握するために行われる数十メートルから 100m 程度の区間長（以下，「長区間」）の水理試験と，FEC 検層により検出した流入点の位置に基づき試験区間が絞り込まれている数メートル程度の区間長（以下，「短区間」）の水理試験がある。長区間と短区間の試験区間が重複する場合は，短区間の試験区間から優先的に割れ目の透水量係数を算出し，重複しない残りの区間については長区間の透水量係数から短区間の透水量係数を差し引いた値を用いて算出した。割れ目の透水量係数の算出方法については，ケース 2 と同様，試験区間に分布する BTV 検層により抽出した「開口割れ目」および「明瞭割れ目」がそれぞれ等しい透水量係数であると仮定して割れ目の透水量係数を算出した。

これらケース 1～3 の方法で割れ目の透水量係数を算出し，その結果に基づき作成した頻度分布をそれぞれ図 4.5.2-5～7 に示す。

割れ目の透水量係数分布以外のパラメータの設定では，第 2 次取りまとめのリファレンスケースに準拠した。解析に用いるパラメータの一覧を表 4.5.2-3 に示す。

表 4.5.2-1 本研究の対象となる調査項目とデータ

| 調査項目 | データ | 引用文献 |
|--------------------|---|------------------|
| 孔壁画像検層 (BTV検層) | <ul style="list-style-type: none"> 割れ目の深度分布 割れ目の開口状態に基づく区分 | DH-2 下茂ほか，2005 |
| | | DH-15 鶴田ほか，2005 |
| | | MIZ-1 魚住ほか，2005 |
| 電気伝導度検層 (FEC検層) | <ul style="list-style-type: none"> 流入点の深度分布 流入点の透水量係数（の比率） | DH-2 竹内ほか，2005 |
| | | DH-15 松岡ほか，2007 |
| | | MIZ-1 魚住ほか，2005 |
| 単孔式水理試験 (水理試験) | <ul style="list-style-type: none"> 試験区間長とその位置 試験区間の透水係数・透水量係数 | DH-2 竹内ほか，2005 |
| | | DH-15 竹内ほか，2005 |
| | | MIZ-1 竹内・藤田，2005 |

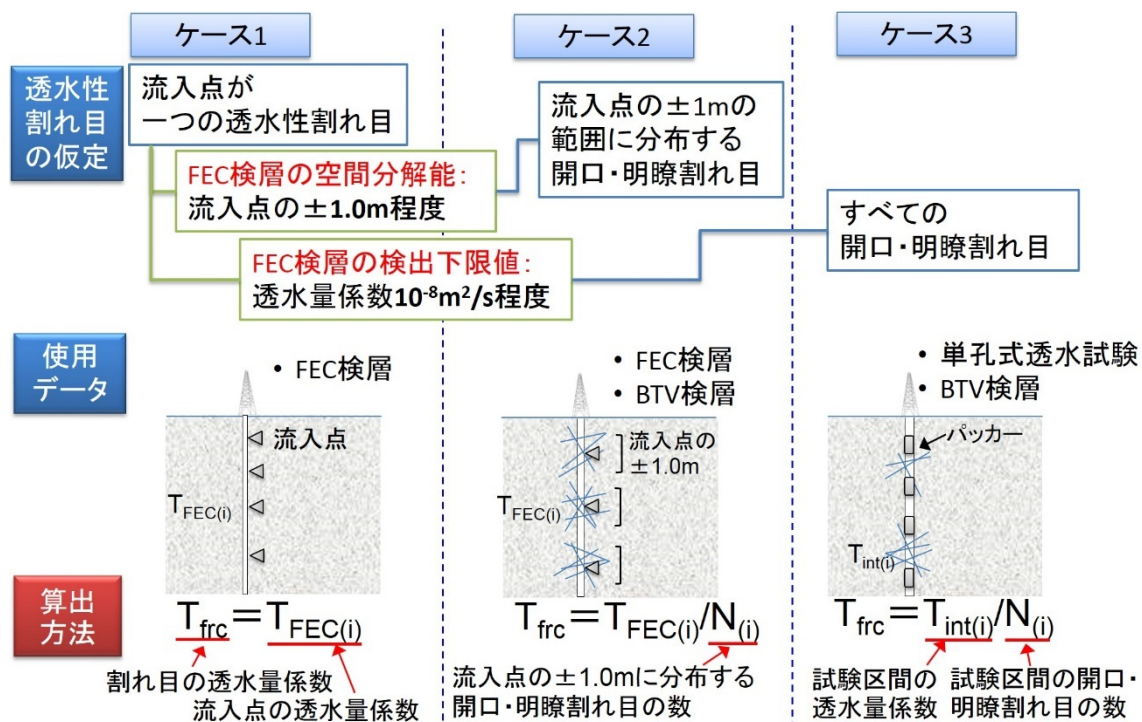


図 4.5.2-4 透水性割れ目と透水量係数の算出方法

表 4.5.2-2 透水性割れ目と透水量係数の算出方法

| | 透水性割れ目の基準 | 使用データ | 透水量係数の算出方法 |
|------|---|---|---|
| ケース1 | FEC検層により検出された流入点が一つの透水性割れ目 | 【FEC検層】 - 流入点の透水量係数 | (透水性割れ目の透水量係数) = (流入点の透水量係数) |
| ケース2 | FEC検層により検出される流入点から±1mの範囲に分布するBTV検層で抽出した‘開口’および‘明瞭’割れ目 | 【FEC検層】 - 流入点の透水量係数 - 流入点の深度分布 【BTV検層】 - 割れ目の深度分布 - 割れ目の開口状態に基づく区分 | (透水性割れ目の透水量係数) = (流入点の透水量係数) ÷ (流入点から±1mに分布する 「開口割れ目」と「明瞭割れ目」の数) |
| ケース3 | BTV検層により抽出した割れ目のうち‘開口’および‘明瞭’割れ目 | 【水理試験】 - 試験区間長とその位置 - 試験区間の透水量係数 【BTV検層】 - 割れ目の深度分布 - 割れ目の開口状態に基づく区分 | (透水性割れ目の透水量係数) = (試験区間の透水量係数) ÷ (試験区間に分布する 「開口割れ目」と「明瞭割れ目」の数) |

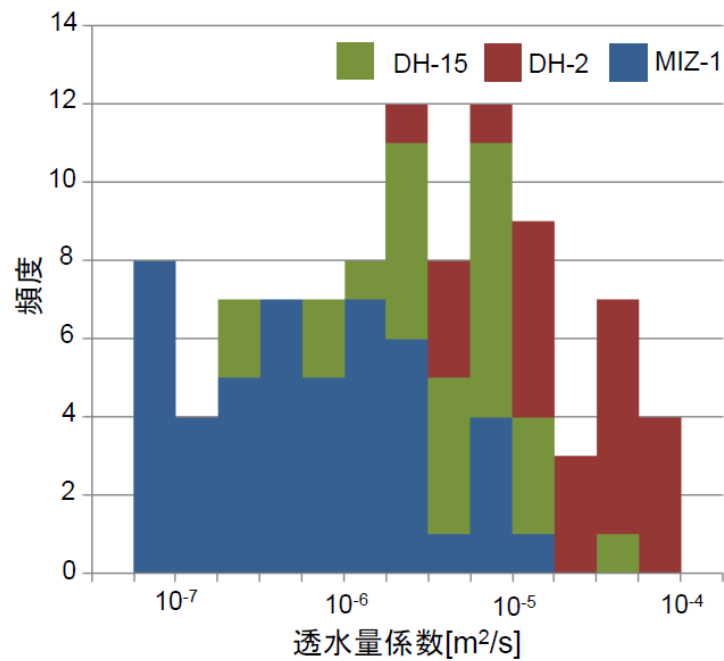


図 4.5.2-5 FEC 検層結果に基づく流入点の透水量係数分布（ケース 1）

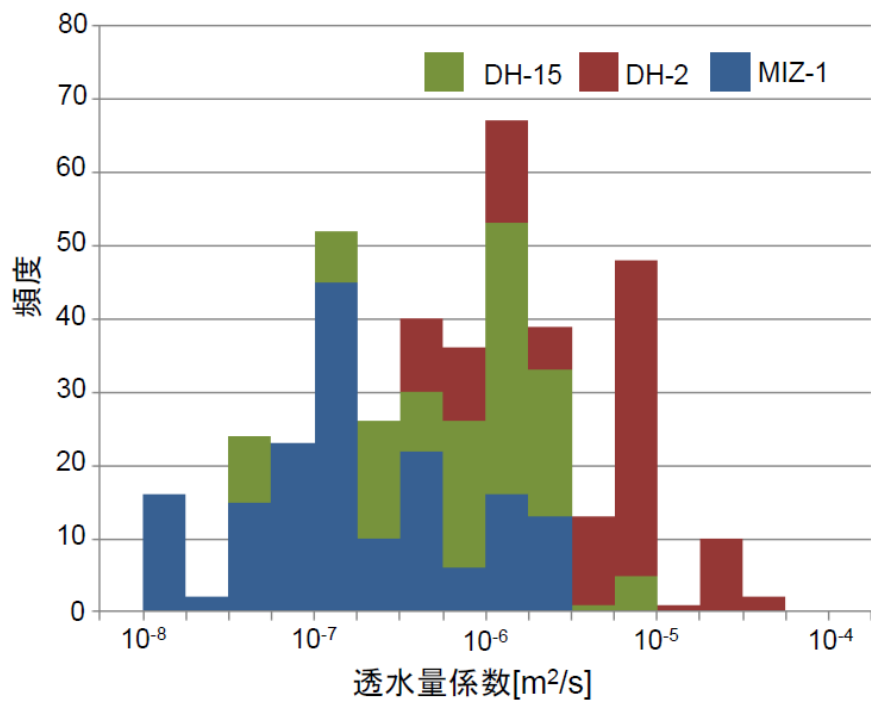


図 4.5.2-6 FEC 検層の流入点の透水量係数と BTV 検層の結果に基づく割れ目の透水量係数分布（ケース 2）

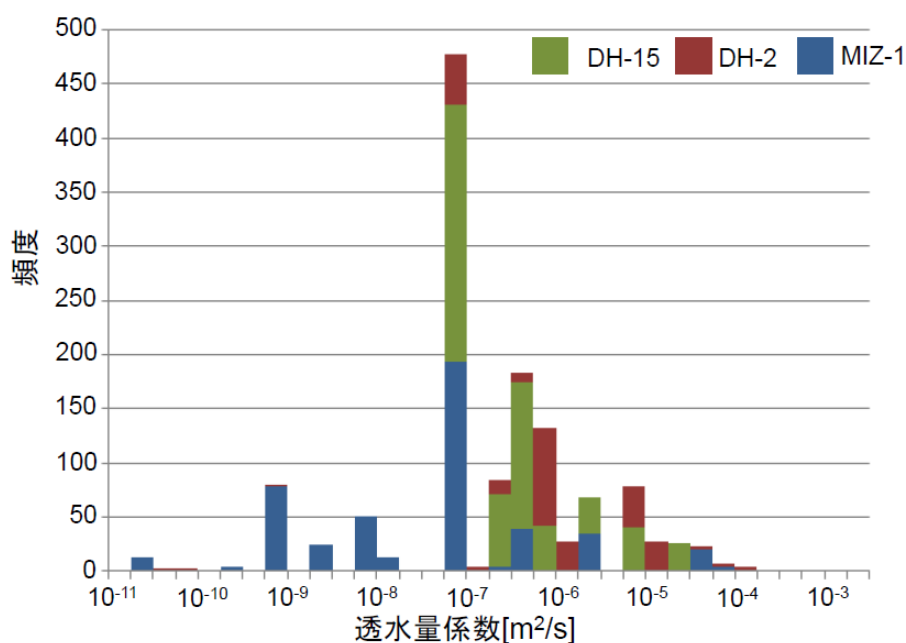


図 4.5.2-7 水理試験結果と BTV 検層結果に基づく割れ目の透水量係数分布 (ケース 3)

表 4.5.2-3 透水量係数分布以外のパラメーター一覧

| パラメータ | 数値 | 単位 |
|--------------|--|---------|
| 亀裂内の移行距離 | 100 | [m] |
| 分散長 | 10 (移行距離の1/10) | [m] |
| 亀裂内分散係数 | $D_L = v \times (\text{分散長})$ $= T / (b \times 2) \times i \times (\text{分散長})$ | [m²/s] |
| マトリクス拡散寄与面積 | 50 | [%] |
| マトリクス部密度 | 2.64 | [kg/m³] |
| マトリクス空隙率 | 2 | [%] |
| 分配係数 | Cs : 0.05, Np : 1 | [m³/kg] |
| 亀裂開口幅 | $2b = 2\sqrt{T}$ | [m] |
| マトリクス拡散深さ | 0.1 | [m] |
| マトリクス空隙中拡散係数 | 3×10^{-12} | [m²/s] |
| 動水勾配 | 0.01 | |
| 崩壊定数 | Cs-135 : 3.01×10^{-7} Np-237 : 3.24×10^{-7} | [1/y] |

(4) 結果

ケース 1～3 の割れ目の透水量係数分布に基づく解析結果を表 4.5.2-4 に示す。

ケース 1 については、FEC 検層により検出した流入点の一つの透水性割れ目

であると仮定し、FEC 検層の結果に基づく数値解析により求められた透水量係数をそのまま用いて割れ目の透水量係数分布を作成した。FEC 検層により検出可能な透水性割れ目の透水量係数の下限値は、 $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であることが分かっている(竹内・藤田, 2005)。本研究において遅延性能の指標とした $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ の透水量係数に対する感度に関する澤田らの結果(澤田ほか, 1999)をベースにしたものを図 4.5.2-8 に示す。Np-237 は Cs-135 より収着性が大きく、遅延性能に対する透水量係数の感度に 1 桁程度の差があり、Cs-135 については $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度、Np-237 については $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度より低い透水性割れ目の場合に遅延性能が発現することが示されている。その結果ケース 1 の割れ目の透水量係数のほとんどは $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ より高く、 $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ は Cs-135 で 0.997, Np-237 で 0.952 となり、ほとんど遅延性能が示されない結果となった。

ケース 2 については、FEC 検層で検出した流入点の透水量係数とその $\pm 1\text{m}$ の範囲に分布する複数の透水性割れ目に対応すると仮定した。ケース 1 と同様、FEC 検層の流入点の透水量係数を用いたが、流入点の空間解像度を考慮して流入点からケース 1 より $\pm 1\text{m}$ の範囲に分布する透水性割れ目は等しい透水量係数を有すると仮定し、透水性割れ目の透水量係数を算出した。BTV 検層により抽出した「開口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目とし、それぞれの透水性は等しいと仮定した。したがって、ケース 2 の透水量係数分布はケース 1 より低い傾向を示す。遅延性能については、Cs-135 の $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ が 0.991 となりほとんど遅延性能に変化は無いものの、Cs-135 より収着性の大きい Np-237 の $\phi_{\text{out}}/\phi_{\text{in}}$ は 0.881 となり、ケース 1 と比較して遅延性能がわずかに高い結果となった。

ケース 3 については、FEC 検層では検出できない低透水性の割れ目がボーリング孔全体にわたって分布していると仮定し、水理試験が実施された区間に分布するすべての「開口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目として割れ目の透水量係数を算出した。その算出には、FEC 検層などの水みちの検出結果に基づき試験区間が絞り込まれた短区間の水理試験のデータと、ボーリング孔全体の透水性を把握するための長区間の水理試験のデータを用いた。そして、ケース 2 と同様の仮定で、試験区間に分布する透水性割れ目の数を除することにより、割れ目の透水量係数を算出した。ケース 3 には、長区間の水理試

験データを用いることにより，検討の対象とする区間が広くなり，比較的低透水の区間についても割れ目の透水量係数を算出できる特徴がある。その結果，三つのケースの中で透水性を呈する割れ目の数が最も多く，その結果，割れ目の透水量係数分布も低透水性側にシフトする傾向を示した。ケース 3 は最も低透水性の割れ目の存在を仮定した算出により透水量係数分布を設定したが，Cs-135 に対する遅延性能を有する透水量係数を持った割れ目がほとんど含まれていない。そのため ϕ_{out}/ϕ_{in} は 0.915 となり，ケース 1 の結果とほとんど変わらない。本研究の場合，ケース 1～3 の透水量係数分布の推定の不確実性が Cs-135 の遅延性能の推定に与える影響は小さい結果となった。これは，前述のとおり，Cs-135 が遅延性能を示す $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ より小さな透水量係数の割れ目の割合がケース 1～3 で大きく変化しなかったためと考えられる。その一方で，Cs-135 より収着性の高い Np-237 では，図 4.5.2-8 に示されるように $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 程度の透水量係数の割れ目である程度遅延性能を発揮するため，特にケース 3 ではそれらの透水性を有する割れ目が多く含まれたため， ϕ_{out}/ϕ_{in} は 0.743 となり，三つのケースの中では最も遅延性能を有する結果となった。

表 4.5.2-4 解析結果一覧

| | Cs-135の ϕ_{out}/ϕ_{in} | Np-237の ϕ_{out}/ϕ_{in} |
|------|--------------------------------|--------------------------------|
| ケース1 | 0.997 | 0.952 |
| ケース2 | 0.991 | 0.881 |
| ケース3 | 0.915 | 0.743 |

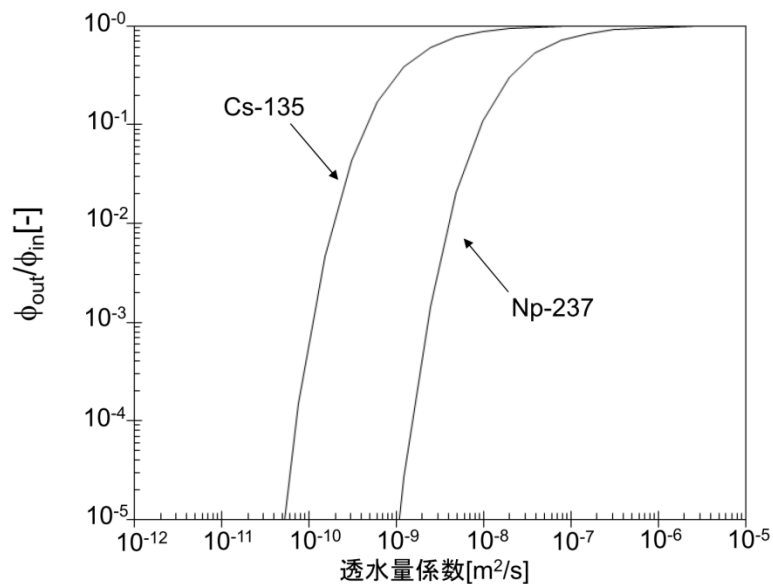


図 4.5.2-8 透水量係数の ϕ_{out}/ϕ_{in} に対する感度
(澤田ほか, 1999 の付録 B の図 B-1 に Np-237 を追加)

(5) 割れ目の透水量係数分布における不確実性の影響と壁面観察の重要性

核種移行遅延性能の評価の試行では、亀裂性媒体の地下水移行シナリオを対象にする際に重要なパラメータとなる割れ目の透水量係数分布に着目し、このパラメータの設定においてのみ具体的な地質環境からの調査データを用いた。可能な限り不確実性を低減した割れ目の透水量係数分布を設定するためには、調査により抽出した個々の割れ目に対して直接計測・解析することによってそれぞれの透水量係数が取得されていることが好ましい。しかしながら、調査の目的やコスト、調査期間の理由から現実的には上述のようなデータを取得することは難しく、本検討において用いた調査データも例外ではない。本検討の解析作業を通じて抽出した割れ目の透水量係数における不確実性の要因を以下の通り挙げる。

- FEC 検層は直接調査によって流入点を検出し、取得したデータを用いた解析によりそれぞれの流入点の透水量係数を得ることができるが、検出できる透水量係数の下限値が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であり、空間解像度は流入点から $\pm 1 \text{ m}$ 程度である。
- BTV 検層の結果に基づき透水性割れ目を設定する場合、抽出した割れ目

のうち「開口」および「明瞭」割れ目を透水性割れ目として扱ったが、これらの割れ目と透水性を関係づけるデータに乏しい。

- 短区間の水理試験は、主要な水みちの把握を目的とした **FEC** 検層の結果に基づき、検出した流入点を含む数メートルから **10m** 程度の区間を対象としていることから、透水量係数が $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ より大きい試験区間を対象とする場合がほとんどである。また、試験区間内に分布する透水性割れ目はすべて等しい透水量係数を有するという仮定によりそれぞれの割れ目の透水量係数が算出されている。
- 遅延性能を有する低透水性の区間に分布する透水性割れ目の透水量係数は、数 **10** から **100m** 程度の試験区間が設けられた長区間の水理試験の結果に基づき、その区間内に分布する透水性割れ目の透水量係数はすべて等しいという仮定のもと算出されることから、空間的な不均質性を考慮するためのデータが乏しい。

本検討の結果は、より低透水性の割れ目の存在も仮定した透水量係数分布の推定の際の不確実性が **Np-237** の遅延性能の推定に大きな影響を与えることを示している。本検討のように簡略的に遅延性能の評価手法で、なおかつ地上からの調査段階といったデータ量の乏しい調査の初期段階であっても、ニアフィールド岩盤の定量的な評価を行うためには、 $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ 程度より低い透水量係数を有する割れ目の検出とその透水性の定量化が可能な調査が求められる。より低透水性の領域に分布する割れ目も含めて不確実性を低減した透水量係数分布の設定を行うためには、低透水性の領域における不均質性を評価できるようなデータ取得が必要となる。例えば、短区間の水理試験により個々の割れ目や断層の透水性を評価可能な調査を適用するとともに、より低透水性の領域に分布する透水性割れ目の検出とその透水性の測定が可能となる技術開発が求められる。

簡略的な核種移行遅延性能の評価と断層や割れ目などの核種移行経路になり得る構造の検出と個々の定量的評価が可能な調査技術は、遅延性能評価と処分場レイアウトの設計の間において情報をやり取りする際に、処分坑道や処分孔に対して交差している構造が避けるべき構造なのか否か、また、ある構造を避

けた場合にどの程度遅延性能が向上するのか判断する際に役立つと考えられる。本検討の手法は、一次元並行平板モデルの重ね合わせに基づいていることから、遅延性能が乏しい透水性構造に対応する割れ目を評価対象の母集団から除外した解析を行うことにより、どの程度遅延性能が向上するのか把握することも可能である。地上からのボーリング調査の段階では、これから坑道を掘削する位置に対して遅延性能の低下が危惧される構造の決定論的な分布情報（位置、方位、大きさなど）が予測できていることが最善であるが、現実的には、確率論的な分布情報の予測になる可能性が高い。そのため、精密調査段階の坑道掘削や処分場建設時の処分坑道掘削においても壁面観察を実施して、事前の遅延性能の低下が危惧される構造の出現程度が事前の予測の範囲内なのか確認し、具体的に処分孔を設置する位置を決定していくことが必要になると考えられる。その際、壁面観察によって得られる情報から遅延性能の低下が危惧される構造を抽出するためには、その構造の地質学的な特徴が明確になっていることが重要である。

4.6 まとめ

国内の地下研究施設における調査事例と国外の処分事業で先行しているスウェーデンの事例に基づき検討された母岩の性能を評価する項目のうち、水理の観点から母岩の適性を評価するために有効と考えられる評価項目を抽出した。そして、調査データなどの不確実性に起因して想定される代替ケースや代替モデルといった複数の選択肢を系統的に示す「評価ツリー」を提案し、抽出した評価項目のうち地下水移行時間を起点として、調査項目・データとの関係を示した。その際、方法論の検討が先行して進められている精密調査地区選定段階（概要調査）を対象として評価ツリーを検討し、具体的な評価事例を示しながら、壁面観察との関係や重要性を示した。地下水移行時間の評価では、1次元モデルに基づく場合と3次元の水理地質構造像モデルに基づく場合のどちらであっても、透水量係数分布が評価結果に対する感度が大きい。より信頼性のある透水量係数分布を設定するためには、ボーリング調査によって抽出される断層や割れ目の個々の透水量係数が透水試験などによって計測され、評価対象の母岩に対してボーリング調査を適切な位置で配置し調査の数を増やして行く

ことが理想的であるが、そのような調査を実施することは、調査の時間やコスト、あるいは現状の調査技術では非常に難しい。このことは、超深地層研究所計画における地表からの調査段階において取得されたボーリング調査データに基づく調査・評価事例からも示された。調査データの取得状況や場の理解度に応じて設定される複数の透水量係数分布の中から、最も信頼できる設定を選択するためには、透水性割れ目の地質学的な解釈が必要であり、ボーリング調査のコア観察からのデータだけでなく、壁面観察による割れ目データが必要である。また、3次元の水理地質構造モデルの構築のベースとなる地質構造モデルあるいは割れ目ネットワークモデルは、調査の初期段階においては、地表踏査やボーリング調査のコア観察によって取得される岩相、層序、断層や割れ目の空間分布に関するデータに基づき構築されるが、調査が進み調査用の地下施設やその後の処分場建設段階では、特に、処分坑道近傍の不確実性を低減する必要があるため、壁面観察からの地質データに基づき更新することが重要となる。地表からの調査の段階（概要調査および精密調査前半）から坑道掘削を伴う調査段階（精密調査後半）へ調査が進展することにより、主要な地質構造分布に関する概念が更新され、坑道周辺の地質構造分布が精緻化される事例を示した。

第4章の参考文献

- Aalto, P., Aaltonen, I., Ahokas, H., Andersson, J., Hakala, M., Hellä, P., Hudson, J., Johansson, E., Kemppainen, K., Koskinen, L., Laaksoharju, M., Lahti, M., Lindgren, S., Mustonen, A., Pedersen, K., Pitkänen, P., Poteri, A., Snellman, M. and Ylä-Mella, M. (2009): Programme for Repository Host Rock Characterisation in the ONKALO (ReRoC), Working Report 2009-31, Posiva Oy.
- Åkesson, M., Kristensson, O., Börgesson, L., Dueck, A. and Hernelind, J. (2010): THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios, SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Andersson, J., Hermanson, J., Elert, M., Moreno, L. and Selroos, J-O. (1998): Derivation and treatment of the flow-wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP23 for use in safety assessment, SKB R-98-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K.-E. and Ericsson, L. O (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation, SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson, L. and Sandén, T. (2008): Piping and erosion in tunnel backfill. Current knowledge, SKB R-06-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cooke, M. L., Underwood, C. A. (2001): Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening, *Journal of Structural Geology*, 23: 223–238.
- Crawford, J. (2008): Bedrock transport properties Forsmark Site descriptive modeling SDM-Site Forsmark, SKB R-08-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dershowitz, W. (1985): Rock Joint Systems, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., 987 pp.
- Doughty, C., Takeuchi, S., Amano, K., Shimo, M. and Tsang, C.-F. (2005) : Application of multirate flowing fluid electric conductivity logging method to well DH-2, Tono Site, Japan, *Water Resources Research*, Vol.41, W10401, doi:10.1029/2004WR003708.
- Doughty, C., and C.-F. Tsang (2000): “BORE II—A code to compute dynamic wellbore electrical conductivity logs with multiple inflow/outflow points including the effects of horizontal flow across the well”, Rep. LBL-46833, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, Calif.
- 動力炉・核燃料開発事業団（PNC）(1992)：高レベル放射性廃棄物地層処分

- 研究開発の技術報告書－平成3年度－, PNC TN 1410 92-081, 動力炉・核燃料開発事業団.
- 舟木泰智, 常盤哲也, 石井英一, 羽出山吉裕, 松尾重明, 津田和康, 小泉朗, 石川泰己, 大條裕一, 杉山和稔 (2008): 幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング(PB-V01 孔)調査報告書; 地質調査, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2008-013.
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2004): 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－, NUMO-TR-04-01, 原子力発電環境整備機構.
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2011): “地層処分事業の安全確保 (2010 年度版)－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－”, NUMO-TR-11-01, 原子力発電環境整備機構.
- Gross, M. R. (1993): The origin and spacing of cross fractures: examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California. *Journal of Structural Geology*, 15: 737–751.
- Helgeson, D. E., Aydin, A. (1991): Characteristics of fracture propagation across layer interfaces in sedimentary rocks. *Journal of Structural Geology*, 13: 897–911.
- Hellä, P., Ikonen, A., Mattila, J., Torvela, T. and Wikström, L. (2009): RSC-Programme - Interim Report. Approach and Basis for RSC Development, Layout Determining Features and Preliminary Criteria for Tunnel and Deposition Hole Scale, Working Report 2009-29, Posiva Oy.
- Hiraga, N., Ishii, E. (2008): Mineral and Chemical Composition of Rock Core and Surface Gas Composition in Horonobe Underground Research Laboratory Project (Phase 1). Tech. Rep. JAEA-Data/Code 2007-022. Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Japan.
- Iijima, A., Tada, R. (1981): Silica diagenesis of Neogene diatomaceous and volcanoclastic sediments in northern Japan. *Sedimentology*, 28: 185–200.

- Ikeda, Y. (2002): The origin and mechanism of active folding in Japan. *Active Fault Research*, 22: 67-70.
- 稲垣学，田中達也，橋本秀爾，前川恵輔，柴田雅博（2012）：地上からの調査段階において地下施設周辺母岩の性能を評価する手法の基礎的検討，*JAEA Research 2011-056*，日本原子力研究開発機構．
- 石原義尚，石黒勝彦，梅木博之（1999）：“Se-79 の半減期の長期化による地層処分システムの性能評価への影響”，*JNC TN8400 99-086*，核燃料サイクル開発機構．
- 石井英一，安江健一，田中竹延，津久井朗太，松尾公一，杉山和稔，松尾重明（2006）：北海道北部，幌延地域における大曲断層の 3 次元分布と水理特性，*地質学雑誌*，第 112 巻，第 5 号，pp.301-314.
- 石井英一，福島龍朗（2006）：新第三紀珪質岩における断層の解析事例，*応用地質*，第 47 巻，第 5 号，pp.280-291.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T., Ota, K. (2010): Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan. *Journal of Structural Geology*, 32: 1792-1805.
- Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., Kurikami, H., (2011a): The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory. Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116, B09206.
- Ishii, E. (2012): Microstructure and origin of faults in siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan. *Journal of Structural Geology*, 34: 20-29.
- Ishii, E. (2016a): Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121: 70-91.
- Ishii, E. (2016b): The role of bedding in the evolution of meso- and

microstructural fabrics in fault zones. *Journal of Structural Geology*, 89: 130–143.

石井英一，安江健一，大平寛人，古澤明，長谷川健，中川光弘（2008）：北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期，地質学雑誌，第 114 巻，第 6 号，pp.286–299.

Ishii, E., Sanada, H., Iwatsuki, T., Sugita, Y., Kurikami, H. (2011b): Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, 122: 215–221.

Ishii, E. (2015): Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 2220–2241.

岩月輝希，佐藤治夫，野原壯，棚井憲治，杉田裕，天野健治，藪内聡，大山卓也，天野由記，横田秀晴，新里忠史，常盤哲也，稲垣大介，阿部寛信，中山雅，操上広志（2011）：幌延深地層研究計画；第 2 期中期計画（平成 22 年度～平成 26 年度）調査研究計画書，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2011-009.

Joyce, S., Simpson, T., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., Swan, D., Marsic N. and Follin, S.(2010): Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark, SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

核燃料サイクル開発機構（JNC）（1999a）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－総論レポート，JNC TN1400 99-20，核燃料サイクル開発機構．

核燃料サイクル開発機構（JNC）（1999b）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-23，核燃料サイクル開発機構．

牧野仁史，澤田 淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本 広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾 繁，濱 克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝

- 志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘（2005）：地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 - 2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第1段階）における地質環境情報に基づく検討，JNC TN1400 2005-021，核燃料サイクル開発機構。
- 松岡清幸，竹内真司，新堀雄一（2007）：電気伝導度検層を用いた水みちの検出例，物理探査学会学術講演会講演論文集，116，pp.149-152.
- McEwen, T. (2002): Host rock classification. Phase 1: The factors that determine the location and layout of a repository – a review, Working Report 2002-36, Posiva Oy.
- Mitsui, K., Taguchi, K. (1977): Silica mineral diagenesis in Neogene tertiary shales in the Tempoku district, Hokkaido, Japan. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47: 158–167.
- Munier, R. (2010): Full perimeter intersection criteria Definitions and implementations in SR-Site, SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB
- Nagra (1994): Kristallin-I, Safety Assessment Report, Nagra Technical Report NTB 93-22.
- 中山雅，天野健治，常盤哲也，山本陽一，大山卓也，天野由記，村上裕晃，稲垣大介，津坂仁和，近藤桂二，横田秀晴，南條功，新里忠史，田中真悟，大原正嗣，神和美（2012）：幌延深地層研究計画；平成23年度調査研究成果報告，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2012-035.
- 中山雅，佐野満昭，真田祐幸，杉田裕（2009）：幌延深地層研究計画；平成20年度調査研究成果報告，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2009-032.
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）（2010）：“超深地層研究所 地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2010-016，日本原子力研究開発機構。
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）（2011）：平成22年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発，日本原子力研究開発機構。

<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/library05.html>

Oda, M., (1985): Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Géotechnique*, 35 (4), pp. 483–495

太田久仁雄，佐藤稔紀，竹内真司，岩月輝希，天野健治，三枝博光，松岡稔幸，尾上博則 (2005)：東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術，JNC TN7400 2005-023.

尾上博則，三枝博光，遠藤令誕 (2005)：繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造モデル化・地下水流動解析（ステップ 2），サイクル機構技術資料，JNC TN 7400 2005-006.

原子力環境整備促進・資金管理センター (2010)：地下水流動を説明するための調査システムフローの評価—RWMC と NDA の共同研究報告書—，原環センター技術報告書，RWMC-JRJ-09001，原子力環境整備促進・資金管理センター．

三枝博光，瀬野康弘，中間茂雄，鶴田忠彦，岩月輝希，天野健治，竹内竜史，松岡稔幸，尾上博則，水野崇，大山卓也，濱克宏，佐藤稔紀，久慈雅栄，黒田英高，仙波毅，内田雅大，杉原弘造，坂巻昌工 (2007)：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第 1 段階)研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043，日本原子力研究開発機構．

澤田淳，井尻裕二，坂本和彦，亘真吾 (1999)：亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析，JNC TN8400 99-093，核燃料サイクル開発機構．

澤田淳，竹内真司，三枝博光，天野健治 (2007)：亀裂性岩盤におけるボーリング調査に基づく水理学的有効間隙率の設定について，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集(CD-ROM).

Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W.(2000): Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi, Northeast Japan, *Engineering Geology*, Volume 56, Issues 1–2, pp.75–96.

Selroos, J. and Follin, S. (2010): SR-Site groundwater flow modeling methodology, setup and results, SKB R-09-22, Svensk

Kärnbränslehantering AB.

Serco (2008): ConnectFlow Release 9.6 Technical Summary Document, Serco Assurance.

重野喜政，宮川公雄 (1995)：地下水流動・物質移行解析における割れ目ネットワークモデルの現状と課題，電力中央研究所報告，調査報告 U95009.

下茂道人，山本肇，城まゆみ，山上順民，文村賢一，熊本創，五十嵐孝文，山本卓也 (2005)：“DH-2 号孔における地下水の水理学的特性調査”，JNC TJ7440-2005-083，核燃料サイクル開発機構.

SKB (1992): SKB 91 - Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB Technical Report 92-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-Can project, SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark, SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2009): Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses, SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010): Framework programme for detailed characterisation in connection with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel, SKB R-11-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Snow, D.T. (1968): Rock fracture spacings, openings, and porosities, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, pp.73-91.

- Ström, A., Almén, K.-E., Andersson, J., Ericsson, L. O and Svemar, C. (1999): Geoscientific evaluation factors and criteria for siting and site evaluation. Progress report, SKB R-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- STUK (2001): Long-Term Safety of Spent Nuclear Fuel. Guide YVL 8.4, ISBN 951-712-470-8, Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK).
- 須甲武志, 高野仁, 内田雅大, 関陽児, 伊藤一誠, 渡部芳夫, 宗像雅広, 田中忠夫, 天野健治 (2014): 幌延深地層研究施設周辺の地質環境情報に基づく地下水流動評価手法の検証に関する研究, 原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9032.
- Svensson, U., Ferry, M. (2010): DarcyTools Version 3.4 – User’s Guide, SKB R-10-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson, U., Follin, S. (2010): Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark, SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 竹内真司, 天野健治, 藤田有二 (2005): “広域地下水流動研究における単孔式水理試験データ”, JNC TN7450 2005-010, 核燃料サイクル開発機構.
- 竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸 (2003): 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会第 58 回年次学術講演会要旨集, pp.413-414.
- 竹内 真司, 藤田有二 (2005): “超深地層研究所計画における単孔式水理試験データ”, JNC TN7450 2005-011, 核燃料サイクル開発機構.
- Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F. (2004): Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.349-354.
- 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, C-F. Tsang (2004): 電気伝導度検層による

深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集, pp.451-456.

Takeuchi, S., Amano, K., Takeuchi, R., Saegusa, H. (2008): Fluid electric conductivity logging: Useful application for characterization of water-conducting features, Proceedings of 36th IAH Congress.

田中靖治, 細谷真一(2008): 岩盤を対象とした原位置トレーサ試験の現状, Journal of MMIJ, Vol.124, pp.601-610.

Tsang, C.-F. and C. Doughty(2003): “Multirate flowing fluid electric conductivity logging method”, Water Resour. Res., Vol.39 No.12, 1354.

Tsang, C.-F., Hufschmied, P., Hale, F.V. (1990): Determination of Fracture Inflow parameters with a Borehole Fluid Conductivity Logging Method, Water Resources Research, vol.26, No.4, pp.561-578.

鶴田忠彦, 藤田有二, 鐙頭正, 彌榮英樹, 富士代秀之 (2005): “広域地下水流動研究におけるボーリング調査(DH-15号孔)”, JNC TN7400 2005-025, 核燃料サイクル開発機構.

梅木博之 (1994): “スイス Nagra Kristallin-I と動燃H3レポートの比較”, 放射性廃棄物研究, Vol.1, pp.13-20.

Umeki, H., Sakuma, H., Ishiguro, K., Hatanaka, K. and Naito, M. (1993): Near-Field Geologic Environment as an Effective Barrier against Radionuclide Transport, Proc. 1993 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, September 5-11, 1993, Prague, Czech Republic, Vol. 1, pp.747-754.

魚住直己, 村上真也, 大石保政, 村上秀紀 (2005): “超深地層研究所計画における試錘調査(MIZ-1号孔)”, JNC TJ7440 2005-091, 核燃料サイクル開発機構.

Vidstrand, P., Follin, S. and Zügec, N. (2010): Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark, SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Vomvoris, S., Andrews, R.W., Lanyon, G.W., Voborny, O., Wilson, W. (1996): Methodology for Deriving Hydrogeological Input Parameters for Safety-Analysis Models - Application to Fractured Crystalline Rocks of Northern Switzerland, Nagra Technical Report 93-14.
- Wei, D., Seno, T. (1998): Determination of the Amurian plate motion. In: Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, Flower, M., Chung, S.L., Lo, C.H., Lee, T.Y. (Eds.), Geodynamics Series 27. American Geophysical Union, Washington, D.C., USA, 337-346.
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1980): Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resources Research, Vol.16, No.6, pp.1016-1024.
- Yamato, A., Masuda, S., Umeki, H., Sakuma, H., Ishiguro, K. and Sasaki, N. (1993): Performance Assessment Study in PNC/H-3 - A Japanese Approach -, Proc. the International Conference SAFEWASTE'93 (Safe Management and Disposal of Nuclear Waste), June 13-18, 1993, Avignon, France, Vol.2: Technical Sessions, pp.455-466.

第 5 章 地層処分事業における壁面観察へのレーザ計測の適用性

地層処分事業のような大規模な地下施設建設プロジェクトにおいて従来手法による壁面観察を実施する場合、以下の問題点が挙げられている。

- 建設コスト管理の観点から観察時間には制限時間が設けられることが予想され、制限時間内に処分場レイアウトの検討や地層処分システムの性能評価などの要求品質（量と質）を満たすデータを取得できない可能性がある。
- 長期間、昼夜にわたって坑道掘削が行われる場合、壁面観察毎に調査員が異なることが予想されるが、データの品質は調査員の経験や能力などに依存するため、データ品質にバラつきが生じることが懸念される。
- 岩盤崩落や落石による労働災害の防止の観点から調査員の露岩部分への立入が制限されることがよくあり、調査員が岩盤に接近した目視観察やクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位測定を行うことができないため、データ取得精度が低下することが懸念される。

本章では、本研究の結果に基づき、レーザ計測の壁面観察への適用が、観察時間の短縮、観察区間毎のデータ品質の平準化およびデータ取得精度の低下の防止に対してどの程度寄与するのか考察する。さらに、レーザ計測を地層処分事業において実施される壁面観察に適用した場合の適用性や有用性について考察する。

5.1 レーザ計測の壁面観察の効率化への寄与

レーザ計測の取得データである点群は、主にレーザ光の反射強度と計測対象物表面の形状を表す 3 次元座標から構成される。図 5.1-1 にレーザ計測の取得データである点群の構成要素と取得できる壁面観察データの関係を示す。レーザ光の反射強度からは、坑道壁面における岩相、変質、湧水などの特徴をマッピングすることが可能であり、その方法は、第 2 章において述べた。3 次元座標からは、坑道壁面に分布する割れ目を抽出し、抽出した割れ目の属性情報を取得することが可能であり、その方法は、第 3 章において述べた。これらの結

果に基づき，レーザ計測の壁面観察への適用が，観察時間の短縮，観察区間毎のデータ品質の平準化およびデータ取得精度の低下の防止に対してどの程度寄与するのか以下に示す。

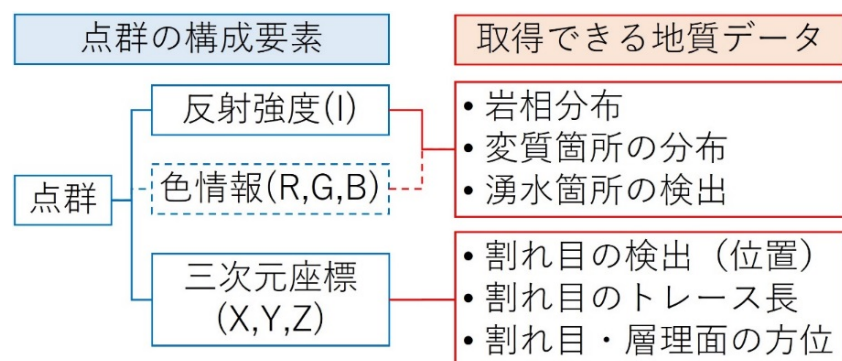


図 5.1-1 点群の構成要素と取得できる地質データの関係

5.1.1 観察時間の短縮への寄与

瑞浪研究所の壁面観察の場合，掘削サイクル毎に割り当てられる観察時間は，立坑では 2～3 時間程度，水平坑道では 1 時間程度である。その時間の中でレーザ計測の所要時間は 20 分程度である。反射強度画像の画像解析では，互層になっている地層のように白黒濃淡が明瞭な岩相や変質程度が明瞭に異なる場合に効果的に地質マッピングを行うことができることが示された。しかしながら，その手法が教師付き分類によるため，レーザ計測を完全な代替手法として調査員の目視観察と置き換えること難しく，調査員は観察対象の坑道壁面を代表する地質が分布する箇所の詳細な地質記載や全体の概略的なマッピングは必要とする。反射強度画像の画像解析は，調査員が目視観察により取得した部分的なデータを補完し，取得データを完全なデータにする役割となる。3 次元座標からの割れ目データの取得についても同様であり，割れ目の記載基準である‘抽出すべき割れ目’のほとんどを 3 次元座標から作成した判読画像から抽出できることが確認できたが，判読画像に基づき作成されるトレースマップを従来手法のトレースマップのレベルに完全に一致させることは現状では難しい。また，点群から取得することができない，特に，定性的な割れ目属性情報は調査員の目視観察によって取得する必要がある。一方，点群に基づく割れ目方位の計測は，従来手法と比べても遜色のない方法と言えるが，計測の有無は，ト

レースマップの精度に依存する。すなわちトレースマップを作成する観点では、調査員の目視による割れ目観察を完全に代替手法としてレーザ計測に置き換えることはできない。

いずれの手法も調査員の目視観察の完全な代替手法としてレーザ計測に置き換えることはできないので、単純にレーザ計測の所要時間である 20 分に短縮することは難しい。しかしながら、坑道壁面の岩相マッピングに関しては、調査員は、代表的な箇所の詳細な岩相記載や全体の概略的な観察に止めることが可能で、隅々詳細に記載する必要がなくなる。また、割れ目データの取得に関して、点群に基づくトレースマップの作成によって、ほとんどの‘抽出すべき割れ目’の分布位置とトレース長を取得できるため、調査員の現場での目視観察を大幅に簡略化できる。さらに、点群データに基づくトレースマップに示される割れ目の方位は、すべて室内作業として点群から測定可能であり、そのトレースマップを調査員の目視観察によって補完することを前提とする場合、現場での割れ目方位測定は不要になる。以上のことから、調査員の目視観察や割れ目方位測定の要する時間を大幅に短縮することができる。レーザ計測の最中でも観察作業を行うことが可能であるため、観察対象の地質や地質構造の状況によっては最短でレーザ計測の所要時間である 20 分に短縮できる可能性もある。

5.1.2 観察区間毎のデータ品質の平準化への寄与

割れ目観察終了後、坑道壁面は、原則として鋼製支保、ロックボルトおよび吹付コンクリートによる支保に覆われるため、遡り調査を行うことはできない（鶴田・笹尾，2016）。そのため、観察区間毎に調査員が異なり、データ品質にバラつきが生じたとしても、観察終了後にそれを改善することは難しいが、レーザ計測から取得される点群を拠り所にして、観察区間毎のデータ品質のバラつきを補正することができる。前述の通り、反射強度画像の画像解析によって、岩相マッピングのデータを補完することが可能であり、例えば、分布位置の補正が可能である。また、割れ目データの取得に関して、点群から作成する判読画像が、バラつきを解消するための基礎データになり得る。点群に基づくトレースマップの再現性は完全ではないが、調査終了後に、割れ目の見落とし

があったか否かを確認できるデータになる。さらに、層理面や割れ目などの地質構造の方位測定を室内作業として行うことが可能になるため、現場で測定を忘れたとしても問題とならない。よって、レーザ計測は割れ目データの平準化に寄与する。

5.1.3 データ取得精度の低下の防止の維持

調査員の労働災害防止の観点から、露出した岩盤に接近した目視観察やクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位測定が行えない。そのため、岩相マッピングや割れ目データの取得精度が低下することが懸念される。この対策としてレーザ計測を導入することによって、調査員の目視観察を簡略化でき、現場での層理面や割れ目などの地質構造の方位測定が不要になる。その結果、現場での観察作業において、調査員が岩盤に接近する必要性を大幅に減らすことができると同時に、調査員におけるデータ取得精度の低下はレーザ計測によって補うことができる。

5.2 レーザ計測の地層処分事業における壁面観察への適用性

第4章で述べたように、地層処分事業において実際の現地調査のデータを用いた解析や評価が開始されるのは、精密調査地区選定段階（概要調査）であり、法定要件などに照らして不適格な場所を避けた上で、母岩としての適性が熱環境、水理場、力学場、化学環境などの処分場の設置環境の観点、および、岩体ある地層の広がりや施工性・経済性など、事業の成立性の観点から評価される（NUMO, 2011）。これらの観点の中で水理場は、断層や割れ目などの岩盤の透水性に影響を与える構造が不均質に分布し、その透水量係数の分布も数桁にわたってばらつく可能性がある一方で、その不均質な透水性構造の個々の透水量係数を計測できる調査方法は存在しないことから、精密調査地区選定段階（概要調査）のような調査データに相対的に乏しい段階では、複数の透水性構造に対する解釈に基づき複数の透水量係数分布を設定され、その結果、力学場、熱環境、化学環境などの評価に比べて不確実性を伴いやすい。第1章で述べたように、地層処分事業の調査は、文献調査、概要調査、精密調査と段階的に進められ、壁面観察は、おそらく精密調査後半の地下に調査施設を建設する段階に

実施されると考えられる。調査の進展に伴って単に具体的な地質環境に対する評価結果の信頼性向上のために、3次元地質構造モデルの確からしさを向上させるだけでなく、透水性構造に対する解釈を絞り込むためには、壁面観察によって確実に地質データを取得することが重要である。

また、調査が終了し処分場を建設する領域を決定した後でも、処分坑道掘削時に出現する透水性構造の頻度や透水性の程度が、処分場設計に対して常に許容範囲内あることを確認する必要があると考えられる。そのため、処分坑道や処分孔掘削時にも壁面観察を行い、坑道壁面に出現する透水性構造となり得る断層や割れ目あるいは帯水層などの分布を壁面観察によって確認することが重要になると考えられる。実際に地層処分事業が先行しているスウェーデンのSKBの場合も、SR-Siteで実施された様々な評価や検討の結果から抽出された不確実性（例えば、地質環境モデルが有する不確実性）は、次段階での調査プログラムへの反映が進められている（SKB, 2010）。前述した割れ目の長さや頻度の確率密度関数の不確実性や、透水量係数と割れ目の長さの相関性の不確実性については、地下坑道でのより具体的な調査計画が検討されている。例えば、壁面観察のような地下坑道での調査が実施されることにより、坑道スケールというより小さなスケールの割れ目に関する情報が得られる。その結果、べき乗モデルでモデル化している割れ目の長さ分布を表しているパラメータ値の不確実性を減ずることができる期待され、そのような坑道スケールのモデルのアップスケールによって、より大きなスケールのモデルの更新も必要であるとしている（SKB, 2010）。また、処分坑道や処分孔を掘削する段階において、処分孔の設置位置に許容される割れ目とその特性を表す評価指標であるFPC（Full Perimeter Criterion）およびEFPC（Extended Full Perimeter Criterion）を適用するために比較的大きな割れ目を検出するための調査プログラムが検討されている（図 5.2-1）。FPC および EFPC は、以下の通り定義される。

- FPC：坑道全周を交差する割れ目がキャニスターの設置位置を横断する場合には、処分孔を設置しない（図 5.2-2 の b のケース）。
- EFPC：併設する 4 つの処分孔を割れ目が連続して横断する場合には、処分孔を設置しない。図 5.2-3 は SR-Site で修正された FPC と EFPC を説明し

ており, 3 の処分孔ではキャニスターの設置位置に割れ目が交差していないが, その割れ目が透水に寄与している場合には処分孔としない。なお, 処分孔の横断本数は SR-Site では 4 本を採用しているが, 5 本以上での定義での検討例 (Munier, 2010) もあり, 今後も改訂される可能性がある。

わが国の処分事業において実施される坑道掘削時の調査がどのような手順で実施されるのか、現段階では決定していないが、透水に寄与する構造を検出することを目的とする場合、図 5.2-1 のような SR-Site に示された調査プログラムによって実施されると考えられる。この調査プログラムに対するレーザ計測の適用性を考える。図 5.2-1 に示す調査プログラムは、‘主トンネルの建設時’、‘主トンネルからのパイロット孔の掘削時’、‘処分坑道の掘削時’、‘処分孔のパイロット孔の削孔時’、‘処分孔の掘削時’の 5 つの段階で、割れ目および水みち割れ目の特性（位置、方位、透水性）を調査し、モデリングにより割れ目および水みち割れ目の長さ、連結性などの評価が行われる。例として、キャニスターの設置位置としては不適格な透水性を有する大規模割れ目 A から E が分布する。大規模割れ目 E はほぼ水平であり、複数のキャニスターと位置にある。‘主トンネルの建設時’では、主要トンネルの掘削の前にパイロット孔が掘削され、このパイロット孔におけるコア観察や水理試験により大規模割れ目 D の存在を検出する。坑道掘削直後の壁面観察では、大規模割れ目 D の湧水の特徴や方位などのより詳細な情報を取得する必要がある。ここで、レーザ計測を適用することが可能である。第 3 章で述べたように、点群の 3 次元座標からの割れ目データの取得においては、透水に寄与するような坑道のほぼ全周にわたって交差する大規模な割れ目は、ほとんど検出することが可能である。また、反射強度や、レーザ光から取得できる情報ではないが色情報を用いることにより、抽出した割れ目の湧水状況やその割れ目の母岩部分の変質状況を推定できる情報を取得できる。主トンネルでは壁面観察以外に、レーザ探査や弾性波探査などを実施して、大規模割れ目 D の大きさを評価できる情報をだけでなく、主トンネルとは交差しない大規模割れ目 A から D の存在を予測する。これ以降の‘主トンネルからのパイロット孔の掘削時’から‘処分坑道の掘削時’にかけて、‘処分孔のパイロット孔の削孔時’から‘処分孔の掘削時’にかけての段階で

は、‘主トンネルの建設時’と同様に、パイロット孔と坑道掘削を繰り返して大規模割れ目の検出が行われる。パイロット孔の段階で大規模割れ目の可能性のある出現位置を検出するので、レーザ計測を適用した壁面観察では注意深く観察すべき箇所をあらかじめ定めることができるため、レーザ計測から割れ目を検出しやすくなると考えられる。わが国の地層処分事業における処分坑道の掘削の工法は、図 5.2-5 に示すように、大断面のトンネル掘削では発破掘削が行われるがそれ以外の大部分の処分坑道は、工期短縮や坑道周辺の岩盤の損傷を低減するために、TBM が採用されることが想定されている（NUMO，2009）。掘削サイクルの中でレーザ計測を効率的に実施するためには、TBM の先端にレーザスキャナを搭載するなどの工夫が必要になるだろう。一方で、TBM によって掘削された坑道壁面形状は、発破掘削より凹凸の少ない形状になる。そのため、割れ目の抽出精度が低下することが考えられる。しかしながら、将来的には 3 次元形状計測の技術が飛躍的に向上すると考えられ、おそらく地層処分事業が始まる十数年後には、さらに点群取得に関して高解像度化、高速化、低ノイズ化が進むことが大いに期待できる。これにより壁面観察データの取得精度を向上させることができる。

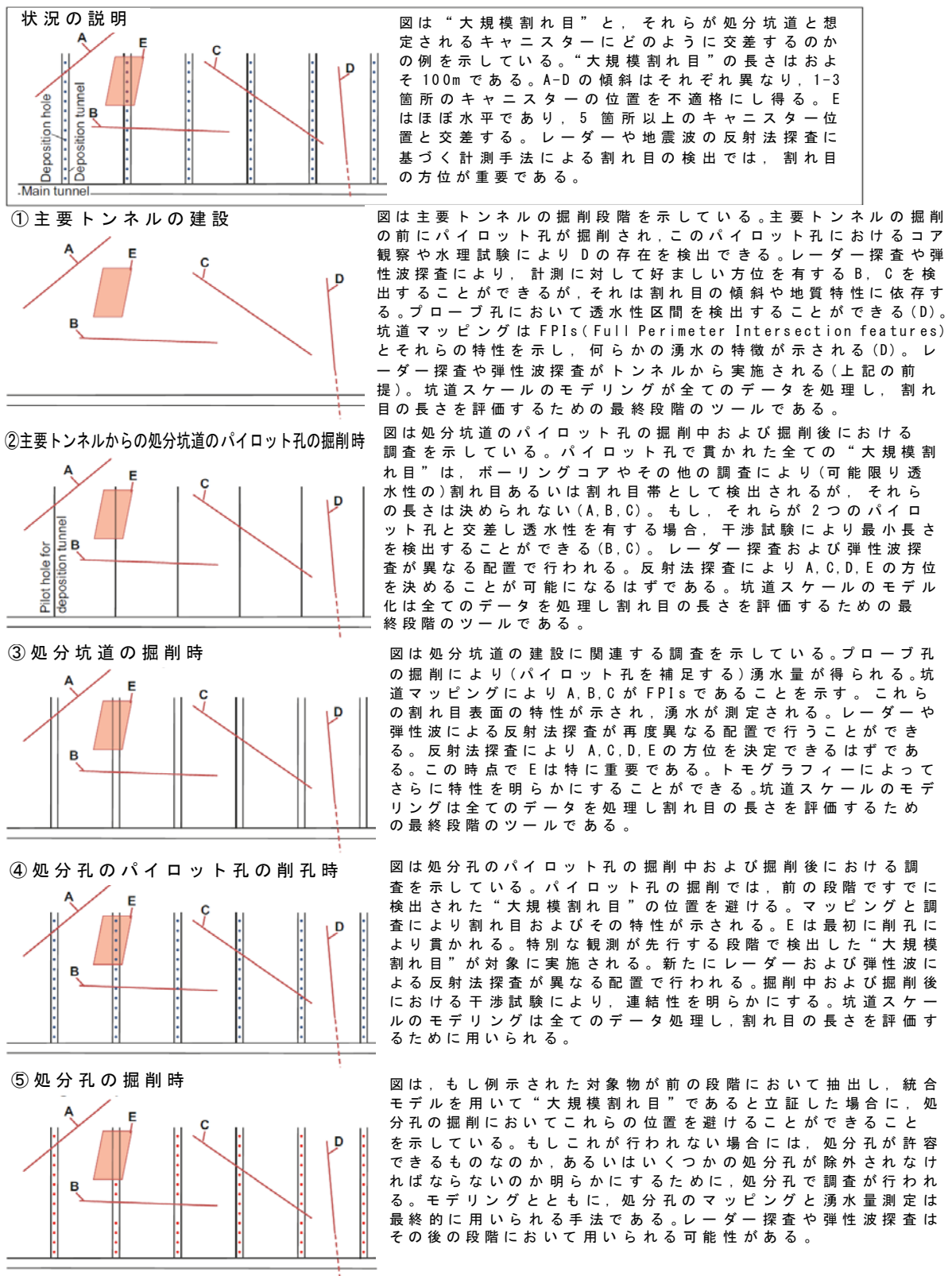


Figure 4-8. Example of how the issue of “large fractures” with application of the EFPC criterion can be handled strategically by different types of investigations and modelling. (FPI and EFPC are explained in Section 2.1.1.)

図 5.2-1 FPC および EFPC を適用するために比較的大きな割れ目を検出するための調査プログラムの案 (SKB, 2010, p.44 の Figure 4-8 を和訳)

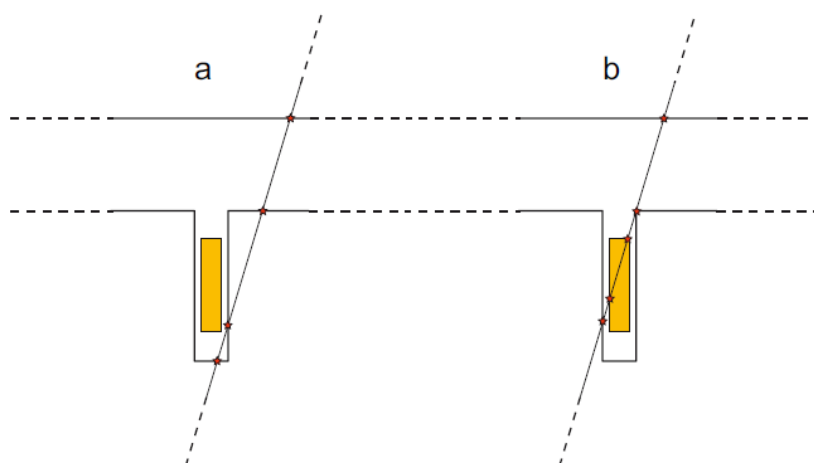


Figure 3-1. In “a” we display the criterion as previously applied in /Munier 2006/. In “b” we display the modified FPC criterion: The FPI mapped in the tunnel is judged to represent the trace of a discriminating fracture if its projection intersects the planned canister position (b).

図 5.2-2 FPC の概要 (Munier, 2010)

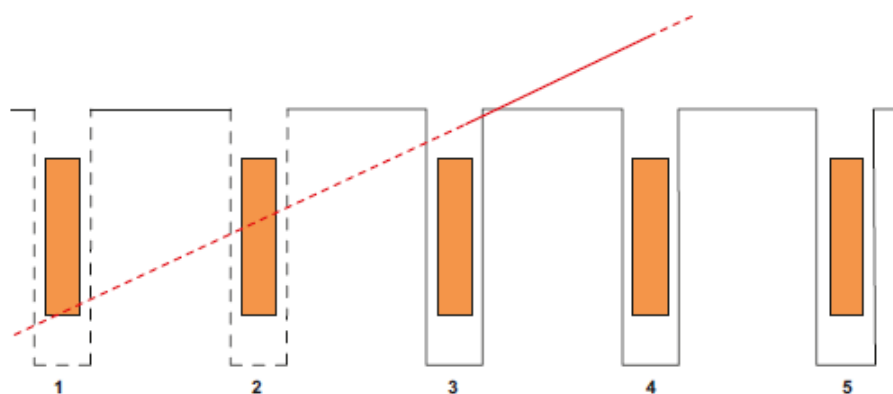


Figure 5-4. In SR-Site, the EFPC criterion is changed such that deposition positions being intersected by a fracture that intersects the full tunnel perimeter and that also is projected to intersect the canister location in the deposition hole, are rejected (i.e. positions 1 and 2). For potentially water bearing fractures the previous criterion still applies (i.e. position 3 is also rejected).

図 5.2-3 SR-Site における FPC と EFPC の概要 (SKB, 2011)

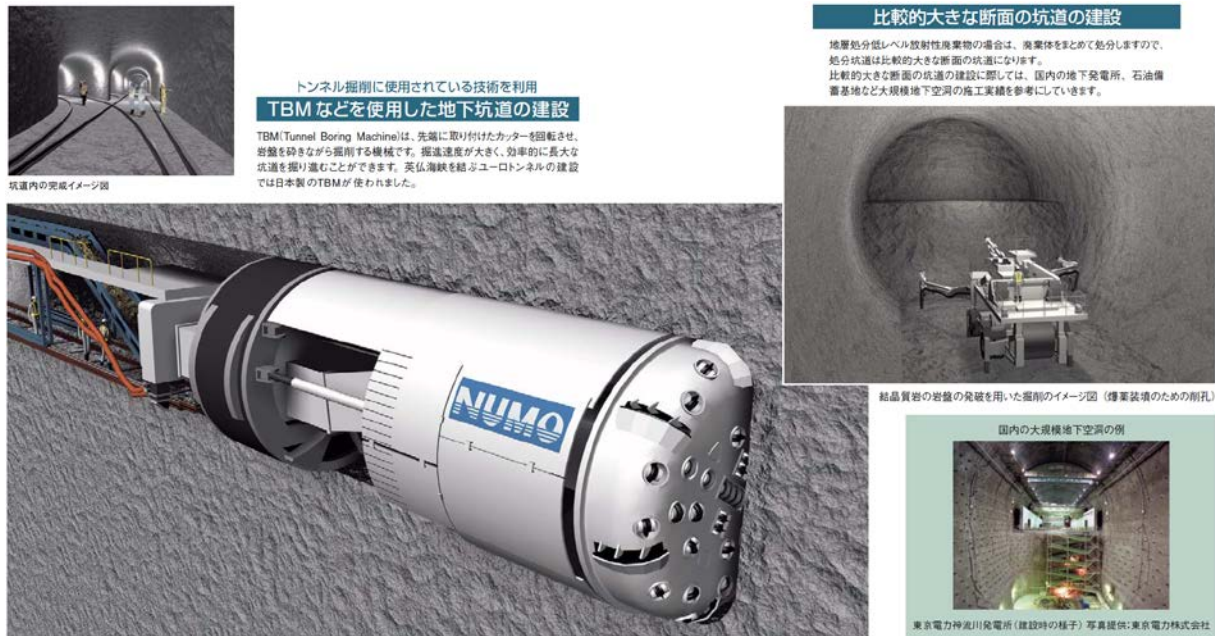


図 5.2-5 処分場の建設のイメージ（NUMO，2009）

第 5 章の参考文献

原子力発電環境整備機構（NUMO）（2009）：放射性廃棄物の地層処分事業について 分冊 1：処分場の概要

原子力発電環境整備機構（NUMO）（2011）：“地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－”，NUMO-TR-11-01，原子力発電環境整備機構．

Munier, R. (2010): Full perimeter intersection criteria Definitions and implementations in SR-Site, SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010): Framework programme for detailed characterisation in connection with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel, SKB R-11-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

鶴田忠彦，笹尾 英嗣（2016）：瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削に伴って実施した壁面地質調査，応用地質，Vol. 56, No. 6, p. 298-307.

第 6 章 総括

6.1 第 1 章から第 5 章までのまとめ

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では，文献調査，概要調査，精密調査といった約 20 年にわたる段階的調査の実施により，処分場建設地さらには廃棄体を定置する母岩が選定され，坑道総延長が 200 km 以上におよぶ地下施設が建設される。現在，実施主体が行う地層処分事業の調査計画や母岩選定に関わる評価方法の検討では，ボーリング調査や物理探査といった地表からの調査が実施される概要調査段階が対象である。そのため，その後の精密調査段階以降の調査計画については示されておらず，地層処分事業における壁面観察の役割や重要性が明らかになっていない。しかしながら，坑道掘削時に行われる壁面観察は，調査坑道掘削を伴う精密調査段階および処分場建設段階において実施されると予想される。現状の壁面観察は，調査員の目視による地質マッピングとクリノメーターを使用した層理面や割れ目の簡易的な方位計測といった従来手法によっている。従来手法に基づく壁面観察を地層処分事業に適用する場合，建設コスト管理の観点から観察時間が制限され，さらに，長期間かつ広範囲にわたる調査のため，多くの調査員の投入が予想される。このような状況下での取得データには，品質の低下やバラつきが懸念され，観察作業の省力化およびデータ品質の平準化が実現できる効率的な手法を用意する必要がある。

地質観察作業の効率化を目的とした既往研究では，計測対象物の 3 次元形状を表す点群を瞬時に取得できるレーザ計測を適用した地質観察手法が検討されている。しかしながら，壁面観察データに関して，点群に基づくデータと従来手法に基づくデータを十分に比較した研究事例が存在しないため，従来手法に基づくデータに対する再現性やレーザ計測を従来手法の代替として適用する場合の具体的な方法が示されておらず，地層処分事業の壁面観察への適用性が判断できていない。

本研究では，地層処分事業における壁面観察の効率化のために，壁面観察の役割や重要性を明らかにするとともに，レーザ計測の壁面観察への適用性を確認することを目的とする。

この目的を達成するために、はじめに、概要調査段階の母岩適性評価において水理場の観点での評価指標の候補である地下水移行時間に着目して方法論を整理し、簡易的な核種移行遅延性能の評価の試行や地質構造モデルの構築の事例によって次段階に実施される壁面観察の役割や重要性を検討した。つぎに、レーザ計測の取得データである点群から従来手法に基づく壁面観察データと比較可能な形式のデータを取得する方法を検討した。その際、従来手法に基づく壁面観察とレーザ計測が並行して実施された超深地層研究所計画の壁面観察のデータを用いて、それぞれのデータを比較し、従来手法に基づくデータの再現性や壁面観察の効率化への寄与について検証した。

以上の結果、壁面観察のデータは、概要調査段階のデータによって構築される地質構造モデルに対して、特に、坑道周辺の地質構造分布を精緻化するために重要であることが分かった。また、ボーリング調査データでは、割れ目の透水量係数を一意に決定することができないため、次段階の壁面観察では、透水性割れ目に関する情報を取得することの必要性が示された。一方、従来手法に基づく壁面観察データと比較可能な形式のデータを点群から取得するための二つの手法を構築した。一つは、米国の **Purdue** 大学が開発した **MultiSpec(c)** を使用して、レーザ光の反射強度画像の画像解析により、坑道壁面に分布する岩相や変質程度を分類する手法を構築した。その際、調査員が作成した地質スケッチと比較するため、教師付き分類の最尤法によって分類した。調査員が作成した地質スケッチと画像解析による分類結果を比較した結果、堆積岩部分では明瞭な白黒濃淡を示す砂岩と泥岩の互層、花こう岩部分では変質程度の分類に効果的であることが分かった。この手法を適用することにより、分類処理のためのトレーニングエリアを選定するために調査員が代表的箇所のみ観察すれば、未観察箇所についても自動的に地質スケッチを補完できることが分かった。もう一つは、**Esri** 社の **ArcGIS** を使用して、坑道壁面形状を表す点群から割れ目を抽出するための判読画像を生成し、それに基づき割れ目の分布位置（抽出の有無）とトレース長を示すトレースマップを作成する方法を構築した。さらに、判読画像から抽出した割れ目に対応する点群に基づき割れ目方位を算出する方法を構築した。点群に基づくトレースマップでは、割れ目観察の記載基準である 1 m 以上のトレース長を有する 250 条の割れ目のうち、83.2%にあたる 208

条が抽出され、トレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7%であった。点群に基づく割れ目方位は、従来手法に基づく割れ目方位と比べても遜色ない結果であった。点群に基づく割れ目データの再現性は、割れ目のトレース長と割れ目面の開口・密着性に依存しており、透水に寄与するトレース長が長くかつ開口性の割れ目の取得精度が良いことが分かった。レーザ計測の適用によって、現場での調査員によるトレースマップ作成を簡略化でき、さらに割れ目方位測定を省略できるため、観察作業の省力化と同時に取得データの品質の平準化への寄与は大きいと言える。

本研究の結果は、地層処分事業の壁面観察にレーザ計測を適用することによって、観察作業の省力化および取得データの品質の平準化を実現できることを示している。地層処分事業における壁面観察では、地質構造モデルの更新のためのデータだけでなく、割れ目の透水量係数分布の不確実性を低減するための情報を得ることが重要である。このような観点から透水に寄与する割れ目の情報を精度よく取得できるレーザ計測の有用性が確認された。

6.2 今後の課題

第5章で述べたとおり、本研究が対象とした瑞浪研究所の坑道掘削は発破工法が採用されているが、将来的に掘削される処分坑道の掘削工法には、TBM が採用される可能性がある。TBM によって掘削された坑道壁面形状は、発破掘削より凹凸の少ない形状になる。これは、反射強度画像の画像解析による地質マッピングにとって有利な条件であるが、一方、点群からの割れ目データの抽出精度が低下することが考えられる。しかしながら、将来的には3次元形状計測器の技術はVR技術の需要向上とともに飛躍的に進歩すると考えられ、おそらく地層処分事業が始まる十数年後には、さらに点群取得に関して高解像度化、高速化、低ノイズ化が進むことが大いに期待できる。本研究で示した点群から地質データを取得する基本的な方法論であり、点群の取得技術の向上により、調査員の目視に依存しないデータ取得が実現できるようになると予想される。そして、調査員の主観に依存しない客観的なデータ取得客観的データの取得のために、点群を入力すると適切な点群処理によって自動的に地層処分事業の各調査や評価の目的に応じた壁面観察データを取得できるといったアルゴリズム

を構築し，それをソフトウェア化することが今後の課題である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、室蘭工業大学大学院の板倉賢一教授には、社会人学生として研究を実施する機会を頂き、終始あたたかくご指導、激励を頂くとともに、研究に対する考え方や取りまとめにあたっての方向性を与えて頂きました。深く感謝いたします。

室蘭工業大学の木幡行宏教授、永野宏治教授には本論文の審査をお引き受けいただき、貴重なご意見を頂きました。厚く御礼申し上げます。

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」）の天野健治氏、鶴田忠彦氏には、本論文の主要テーマである 3 次元レーザスキャナによる坑道壁面の地質観察の効率化に関する研究を実施する機会を与えて頂き、そして、博士課程への入学を後押しして頂きました。また、入学当時、原子力機構の東濃地科学センター所長であった大澤正秀氏にも博士課程への入学を強く勧めて頂き、在学中は激励を頂きました。心より感謝いたします。

原子力機構の野原壮氏、佐藤稔紀氏には、私が幌延深地層研究センターに在籍して以降、社会人学生としての研究が進めやすい環境になるようご配慮頂きました。また、原子力機構の松岡稔幸氏にもご配慮頂くとともに、日々の議論を通じて本論文に有益なご助言を頂きました。深く感謝いたします。

第 2 章および第 3 章において用いた 3 次元レーザスキャナ計測を含めた研究坑道の壁面地質調査のデータは、原子力機構および大林・大成・安藤ハザマ特定共同企業体の技術者によって取得されました。三井住友建設株式会社の山地宏志氏、大津慎一氏には、点群の処理方法や可視化の方法などについてご教示頂きました。先行して反射強度画像の画像解析に関する検討を行っていた電源開発株式会社の持田裕之氏には、その方法や 3 次元レーザスキャナの今後の展望についてご教示頂きました。原子力機構の石橋正祐紀氏には、300m 研究アクセス坑道における割れ目データについてご教示頂きました。室蘭工業大学の鈴木幸司教授に点群を用いた形状分析に関してご議論頂き貴重な助言を頂きました。室蘭工業大学の徐招峰氏、松川瞬氏には、私が大学に通学した際、点群の処理・可視化方法や地質データの取得方法についてご議論頂くとともに、情報処理に関する技術的なご助言を頂きました。原子力機構の酒井利啓氏、山口正秋氏には、ArcGIS の操作方法に関してご指導頂きました。厚く御礼申し上げます。

原子力機構の澤田淳氏には、私が原子力機構の核燃料サイクル工学研究所に在籍していた間、日々の議論を通じて、第4章に関連する水理の観点からの母岩適性評価の方法論やニアフィールド岩盤の遅延性能評価に関する数多くのことをご教示頂きました。また、第4章に示した評価ツリーの作成においては、原子力発電環境整備機構と原子力機構の共同研究のうち、「対象母岩の選定に関する検討」に係わった皆様との議論を通じて、評価ツリーが有意義なものになるようにご指導頂き、有益なご助言を頂きました。原子力機構の石井英一氏には、評価ツリーの作成に関して有益なご助言を頂いたほか、私が幌延深地層研究センターに在籍して以降、日々の議論を通じて幌延地域の地質構造についてご教示頂きました。心より感謝いたします。

最後に、私が社会人学生として博士課程に入学し論文を取りまとめることに對して理解し、いつも私を支えてくれた妻 佳織に心から感謝します。